

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Studium nasazení optické přístupové sítě nové generace na
stávající topologie**

**Study of New Generation Optical Access Network
Deployment on Current Network Topologies**

2014

Jan Vavrečka

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Vavrečka**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: Studium nasazení optické přístupové sítě nové generace na stávající topologie
Study of New Generation Optical Access Network Deployment on Current Network Topologies

Zásady pro vypracování:

Přístupové sítě nové generace jsou definovány (podle textu Doporučení Evropské komise K(2010) 6223 ze dne 20. září 2010 o regulovaném přístupu k přístupovým sítím nové generace (NGA) jako kabelové přístupové sítě, které jsou tvořeny zcela nebo zčásti z optických prvků a které jsou schopné dodávat služby širokopásmového přístupu s dokonalejšími vlastnostmi (např. s vyšší propustností) ve srovnání se službami poskytovanými prostřednictvím stávajících sítí založených na kovovém vedení. Ve většině případů jsou sítě NGA výsledkem modernizace již existujících přístupových sítí. Cílem absolventské práce je studium nasazení optické přístupové sítě nové generace WDM-PON na topologii stávající optické přístupové sítě GEPON.

1. Popište vlastnosti optických přístupových sítí nové generace.
2. Proveďte analýzu možností nasazení optických přístupových sítí nové generace na topologii stávajících optických přístupových sítí.
3. Popište výhody jednotlivých variant, které doložíte analýzou v laboratorních podmínkách při využití sítě nové generace WDM-PON z hlediska primární vrstvy i z hlediska nasazení služby Triple Play.

Seznam doporučené odborné literatury:

PRAT, Josep, W POPOOLA a S RAJBHANDARI. *Next-generation FTTH passive optical networks: system and channel modelling with MATLAB*. New York: Springer, 2008. ISBN 978-140-2084-690.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 5. května 2014



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Koudelkovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou nasazení optické přístupové sítě nové generace na stávající technologie. První kapitola popisuje optické přístupové sítě a jejich základní rozdělení. Druhou kapitolu teoretické části tvoří rozbor pasivních optických přístupových sítí, hlavní vlastnosti standardů APON, BPON, GPON a EPON. Třetí kapitola se zabývá optickými přístupovými sítěmi nové generace. Přičemž standard WDM-PON je podrobně vysvětlen. V praktické části je provedeno testování navržených pasivních optických sítí. Pomocí spektrálního analyzátoru se ověřila funkčnost navržených topologií. Pro ověření přenosových parametrů sítí bylo použito doporučení RFC 2544. K ověření Triple Play služeb byl využit standard ITU-T Y.156sam(EtherSAM). Praktickou část zakončuje naměřené výsledky a jejich vyhodnocení.

Klíčová slova

Optická přístupová síť; Pasivní optická přístupová síť; Síť nové generace; WDM-PON; GPON; Nasazení; Triple Play.

Abstract

This bachelor thesis deals with new generation optical access network deployment on current network topologies. The first chapter describes optical access networks and their basic division. The second chapter of the theoretical part consists of an analysis of passive optical networks, the main features of the standards APON, BPON, GPON and EPON. The third chapter deals with optical access network of new generation. The WDM-PON standard is explained in detail. Testing of designed passive optical networks is performed in the practical part of the thesis. Using a spectrum analyzer to verified the functionality of the proposed topologies. To verify the transmission parameters of the network was to use the recommended RFC 2544. To verify Triple Play services was used standard ITU-T Y.156sam (EtherSAM). The practical part ends measurement results and their evaluation.

Key words

Optical access network; Passive optical network; Next generation network; WDM-PON; GEAPON; Deployment; Triple Play.

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
TDM	Time Division Multiplexing
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AON	Active Optical Network
APON	ATM Passive Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BPON	Broadband Passive Optical Network
CIR	Committed Information Rate
CWDM	Coarse Wave Division Multiplex
DWA	Dynamic Wavelength Assignment
DWDM	Dense Wave Division Multiplex
EIR	Excess Information Rate
EMS	Element Management System
EPON	Ethernet Passive Optical Network
FDM	Frequency Division Multiplex
FP	Fabry Perot
FP-LD	Fabry Perot – Laser Diode
FSAN	Full Service Access Network
FSO	Free Space Optics
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The Curb
FTTE_x	Fiber To The Exchange
FTTH	Fiber To The Home
FTTN	Fiber To The Node
FTTO	Fiber To The Office
GEM	GPON Encapsulation Method
GEPON	Gbps Ethernet Passive Optical Network

GPON	Gigabit Passive Optical Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers'
IMS	IP Multimedia Subsystem
IPTV	Internet Protocol Television
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITU	International Telecommunication Union
ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunication
LR-PON	Long Reach – Passive Optical Network
MAC	Media Access Control
MGC	Media Gateway Controller
NGA	Next Generation Access
NGN	Next Generation Network
NT	Network Termination
OAN	Optical Active Network
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
P2MP	Point To Multipoint
P2P	Point To Point
PON	Passive Optical Network
QoS	Quality of Service
RFC	Request For Comment
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SGW	Signalling Gateway
TDM	Time Division Multiplex
TDM	Time Division Multiplexing Access
VoIP	Voice over Internet Protocol
WDM	Wave Division Multiplex
WWDM	Wide Wave Division Multiplex

Obsah

Úvod.....	11
1 Optická přístupová síť	12
1.1 Rozdělení OAN	12
1.2 Dělení dle typu spojení.....	13
1.3 Základní funkční celky OAN	14
1.4 Topologie ODN.....	15
1.5 Varianty FTTx.....	16
2 Pasivní optické přístupové sítě.....	18
2.1 Princip přenosu.....	18
2.2 APON	19
2.3 BPON	19
2.4 GPON/XG-PON	20
2.5 EPON/10GEPON	20
2.6 Porovnání parametrů jednotlivých PON sítí.....	22
3 Sítě nové generace NGA	23
3.1 Architektura NGA	23
3.1.1 NGA1	25
3.1.2 NGA2	25
3.2 WDM-PON	26
3.2.1 Vlnový multiplex.....	26
3.2.2 Výhody a nedostatky WDM-PON.....	27
3.2.3 WWDM.....	27
3.2.4 CWDM.....	27
3.2.5 DWDM.....	28
3.2.6 Varianty WDM-PON	29
3.3 Hybridní PON	32
3.4 PON s aktivními prvky.....	32
3.4.1 SPON.....	33
3.4.2 L-R PON.....	33

4	Praktické měření.....	34
4.1	Popis experimentálního pracoviště.....	34
4.2	RFC 2544	37
4.3	ITU-T Y.156sam (EtherSAM)	38
4.4	Konfigurace zařízení	39
4.5	Použité topologie.....	42
4.6	Spektrální analýza	44
4.7	Naměřené hodnoty RFC2544.....	47
4.7.1	Topologie GEPON	48
4.7.2	Topologie WDM-PON	49
4.7.3	Topologie WDM & TDM PON	50
4.7.4	Topologie GEPON a WDM-PON na společném vlákně.....	51
4.8	Naměřené hodnoty ITU-T Y.156sam (EtherSAM).....	53
4.8.1	Topologie GEPON	54
4.8.2	Topologie WDM-PON	55
4.8.3	Topologie WDM & TDM PON	55
4.8.4	Topologie GEPON a WDM-PON na společném vlákně.....	56
	Závěr	58
	Použitá literatura	59
	Seznam příloh.....	61

Úvod

Vývoj komunikačních a informačních technologií je v dnešní době nezastavitelný. Hlavní příčinou je neustálé zvyšování kvality poskytovaných služeb, například služby Triple Play. Jedná se o služby IPTV ve vysokém rozlišení, HD video hovory ve VoIP (Voice Over IP) a širokopásmové přenosy data poskytované uživateli ve společném balíčku. Pro správnou funkci těchto služeb je zapotřebí vysoká rychlost internetového připojení, až stovky Mbps. Dnešní technologie časem nebudou dostačující, jedná se o metalické sítě (ADLS2+, VDSL), či bezdrátové připojení (Wi-Fi).

Na řadu se dostávají optické přístupové sítě. Nejperspektivnější technologie je pasivní optická přístupová síť (Passive Optical Network) a její varianty GPON (Gigabit PON), EPON (Ethernet PON). Dále následují pasivní optické sítě nové generace NGN (Next Generation Network), mezi které patří WDM-PON, XG-PON1, XG-PON2, 10GEPON, SPON a L-R PON. Z těchto uvedených technologií je nejznámější WDM-PON (Wavelength Division Multiplex-PON), která využívá přenos pomocí vlnového multiplexování WDM, tedy umístění více oddělených vlnových délek do společného vlákna. Postupně došlo k rozdělení na variantu CWDM (Coarse WDM - hrubý vlnový multiplex) a DWDM (Dense WDM - hustý vlnový multiplex), které nám určují odstup vlnových délek.

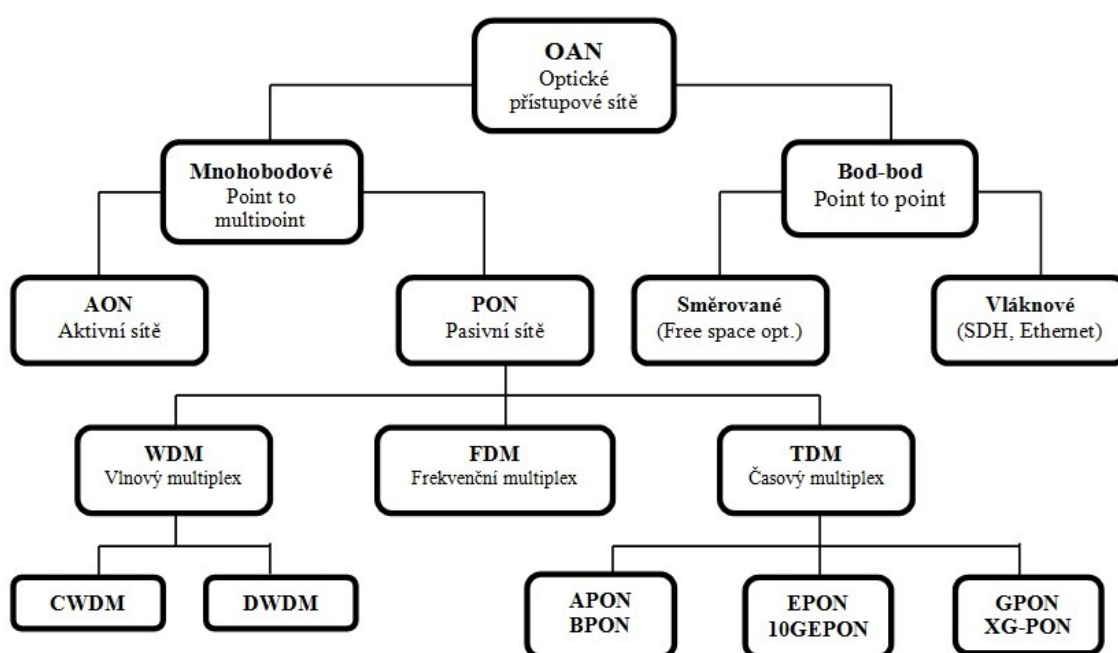
Z hlediska nákladů na přestavbu přístupových sítí jsou nejnákladnější optické distribuční sítě ODN. Proto je zásadní, aby první generace NGN byla plně kompatibilní s používanými systémy. Problematika nasazení optické přístupové sítě nové generace WDM-PON na topologie stávající optické přístupové sítě GPON je hlavním úkolem mé bakalářské práce.

1 Optická přístupová síť

Přístupová síť propojuje poskytovatele se zákazníkem a umožňuje mu přístup k poskytovaným službám. Tato síť se používá již několik let pomocí metalického vedení, ale v dnešní době je tendence přecházet na vedení optické. Hlavně kvůli neustálému rozvoji nových technologií náročných na přenosovou rychlost. Jedním z prostředků jak nabídnout koncovému uživateli potřebnou přenosovou rychlost, je využití optických technologií a realizace optických přístupových sítí OAN (Optical Access Network).

1.1 Rozdělení OAN

Základní rozdělení optických přístupových sítí je zobrazeno na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Rozdělení optických přístupových sítí [8].

Základní rozdělení optické přístupové sítě je podle typu spojení. První variantou je bodové spojení (Point to Point) a více bodové spojení (Point to Multipoint) je varianta druhá. Optické přístupové sítě můžeme dále dělit podle použitých prvků, technologií, multiplexu a realizace.

Sítě dále dělíme podle použitého přenosového média, jedná se o síť s optickými vlákny a síť FSO (Free Space Optics). FSO je technologie pracující na stejném principu jako optické vlákno s tím rozdílem, že přenosovým médiem je volná atmosféra.

Přístupové sítě, které jsou založeny na optickém principu, můžeme rozdělit na dvě velké skupiny. A to na pasivní optickou síť PON (Passive Optical Network), a na aktivní optickou síť AON (Active Optical Network).

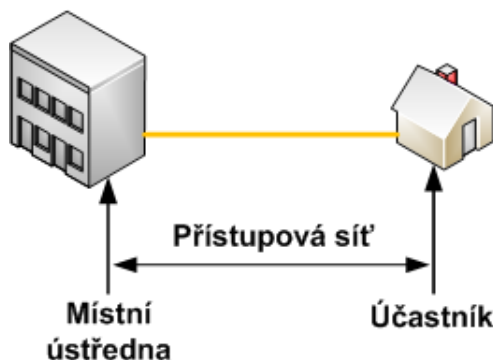
Aktivní optická síť obsahuje aktivní prvky (optické zesilovače, směrovače, přepínače, opakovače atd.), které vyžadují samostatné řízení a napájení. Na rozdíl pasivní optická síť používá pro svou funkci pasivních prvků (pasivní rozbočovač anglicky splitter). Základní technologie pasivních optických sítí budou rozebrány v kapitole 2.

1.2 Dělení dle typu spojení

Pro realizaci optické přístupové sítě se používají P2P (Point to point) a P2MP (Point to multipoint) technologie. Tyto technologie se realizují v závislosti na počtu koncových uživatelů [8].

- **Technologie P2P**

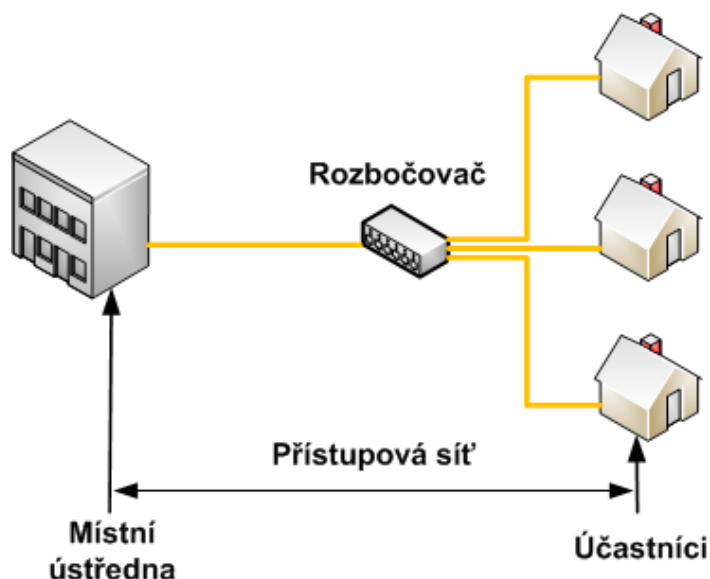
Jedná se o přímé propojení poskytovatele služeb a jedné koncové jednotky (viz. obrázek 1.2). Jednotliví uživatelé jsou propojeni zvlášť jedním nebo dvěma optickými vlákny. Při využití dvou vláken je jedno použité pro směr k účastníkovi (Downstream) a druhé vlákno pro směr od účastníka (Upstream). U jednoho vlákna se využívá spektrálního multiplexu, kde pro každý směr je specifikována jiná vlnová délka. I když se jedná o jednoduchou architekturu, náklady jsou velmi vysoké. A to kvůli využívání aktivních prvků v síti. Vhodné použití například pro páteří bezdrátové sítě, optické sítě a metalické sítě typu Ethernet.



Obrázek 1.2: Spojení typu Point to Point.

- **Technologie P2MP**

Tato architektura se využívá při propojení poskytovatele s větším počtem uživatelů. V síti se nachází rozbočovací prvek, který dělí vlákno na určitý počet vláken podle počtu uživatelů. Tato technologie výrazně šetří optickými vlákny. Na druhou stranu jsou na měření a správu složitější. Rozlišujeme dva základní druhy podle použitých rozbočovacích prvků v síti a to na aktivní a pasivní. Tento model je vhodné využít například pro bezdrátové sítě, metalické sítě typu ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) nebo optické sítě typu PON (Passive Optical Network). Technologie P2MP je zobrazena na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: *Spojení typu Point to Multipoint.*

1.3 Základní funkční celky OAN

Základem optických sítí jsou tři základní prvky a to vysílač, přenosové médium a přijímač. Vysílač je zdroj záření, které hlavně využívá PN přechod v propustném směru. V optoelektronice se jako zdroj záření používá LD (Laser Diod) a LED (Light Emitting Diod). Přenosové médium je optické vlákno, ve kterém je informace přenášena pomocí záření ve formě fotonu. Na straně přijímače se také používá PN přechod, ale oproti vysílači je v závěrném směru.

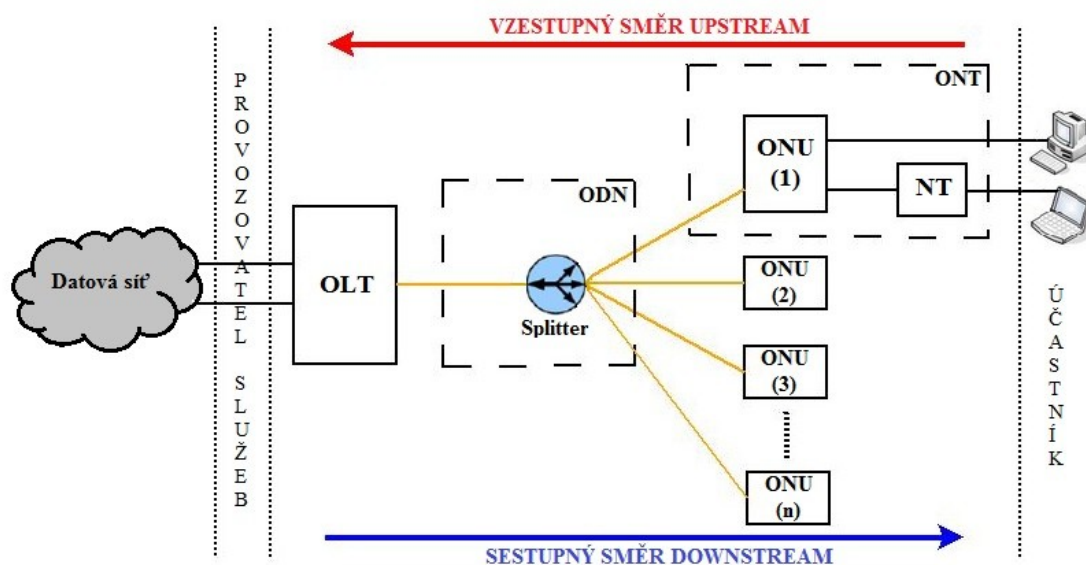
Optická přístupová síť nám poskytuje přenos signálu mezi koncovým bodem a spojovací sítí. Pro funkčnost těchto sítí musí být složena z několika částí. Na straně provozovatele se používá (OLT) a na straně uživatele (ONT/ONU). Jedná se o aktivní prvky.

Základními funkčními celky optických přístupových sítí jsou:

- Optické linkové zakončení (Optical Line Termination – **OLT**) – má funkci síťového rozhraní mezi přístupovou sítí a sítěmi telekomunikačních služeb. OLT jednotka se nachází na straně sítě, má dohled nad jednotlivými koncovými jednotkami.
- Optická distribuční síť (Optical Distribution Network – **ODN**) – soubor optických přenosových prostředků mezi OLT a jednotkami ONU. Jedná se zejména o optická vlákna, aktivní a pasivní optické rozbočovače, konektory, spojky, vlnové filtry, multiplexery.
- Optické ukončující jednotky (Optical Network Unit – **ONU**) – má funkci, která zajišťuje přechod mezi rozhraním optické části a metalické části sítě.

- Optické síťové zakončení (Optical Network Termination – **ONT**) – jedná se o zařízení, které se nachází na rozhraní účastnické, a přístupové části sítě. Zprostředkovává funkce mezi těmito rozhraními a zajišťuje spojení koncových zařízení.
- Síťové zakončení (Network Termination – **NT**) – v telekomunikacích se používá na straně uživatele, jako obecné síťové zakončení [1].

Uspořádání těchto jednotek v rámci přístupové sítě je na obrázku 1.4.



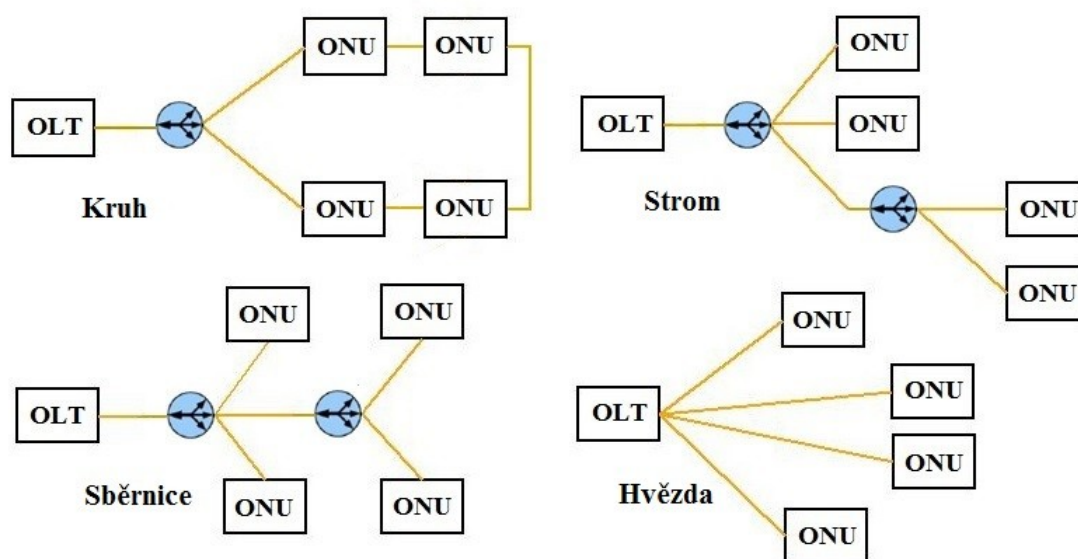
Obrázek 1.4: Optická přístupová síť.

1.4 Topologie ODN

Optické sítě se většinou nacházejí v ODN v několika různých typech topologií. Nejpoužívanější topologie vidíme na obrázku 1.5. Mezi tyto typy patří:

- **Kruh**
- **Sběrnice**
- **Hvězda**
- **Vícestupňová hvězda (Strom)**

Pro připojení domácností se nejčastěji používá stromová topologie. Jedná se o uspořádání v podobě vícestupňové hvězdy. Sběrníková topologie podobná Ethernetu se uplatňuje například pro univerzitní účely. Strukturu uspořádání v podobě kruhu můžeme realizovat v podnikových sítích, u kterých je potřeba oddělení vnitřní sítě od vnější sítě a zároveň nabízet vysokorychlostní spojení v rámci vnitřní sítě.



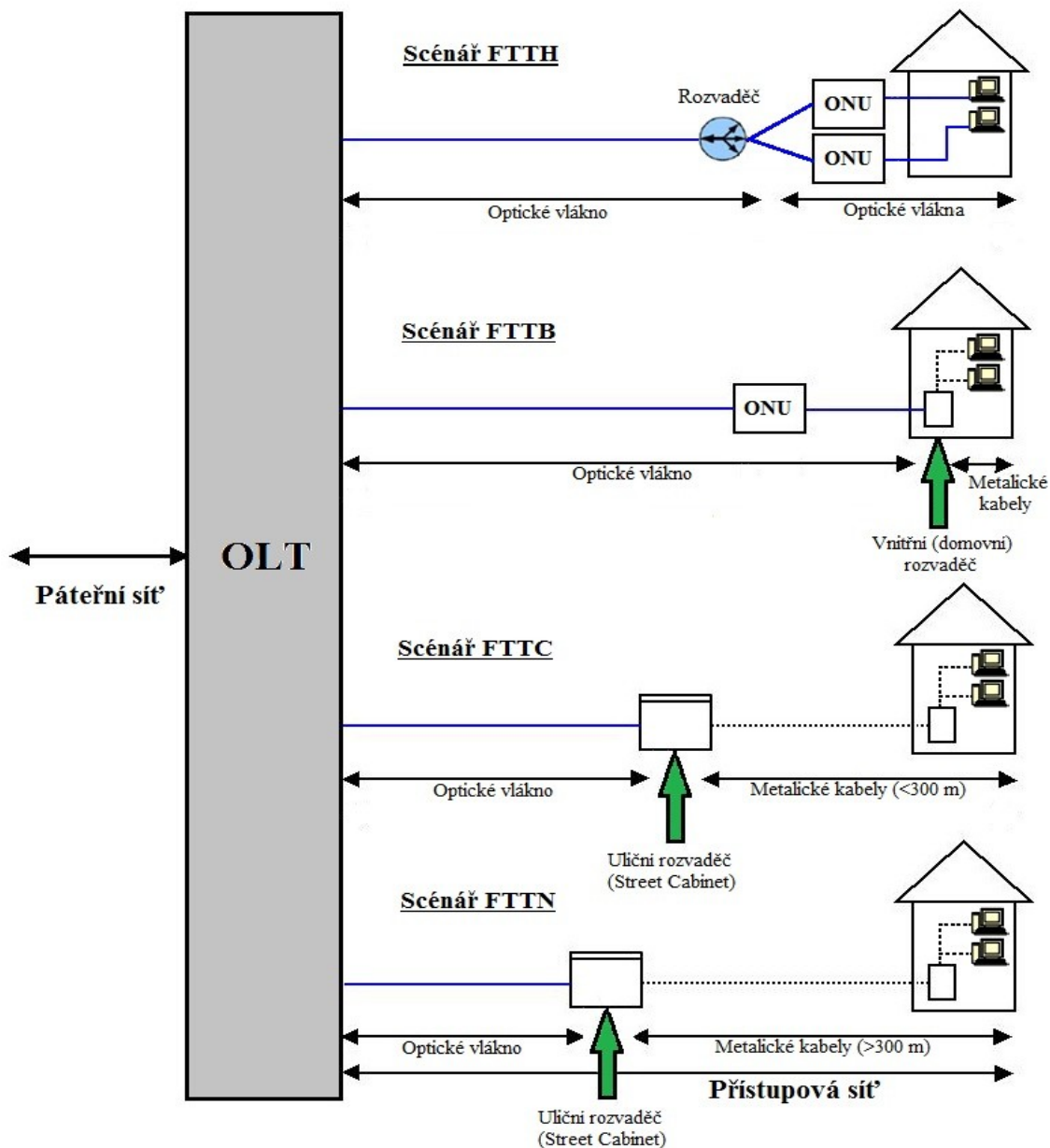
Obrázek 1.5: Topologie Optických distribučních sítí.

1.5 Varianty FTTx

Optické přípojky rozlišujeme podle způsobu umístění koncové jednotky ONU a podle místa kde je optické vlákno ukončeno. Obecně pak hovoříme o variantách FTTx (Fiber To The „x“). Kde za „x“ lze dosadit nejčastěji varianty jako například **Ex** – Exchange(ústředna), **Cab** – Cabinet(terénní ukončení), **N** – Node (uzel), **C** – Curb (sídliště), **B** – Building (budova), **O** – Office (kancelářské prostory) a **H** – Home (uživatel). Nejvíce využívané varianty přípojek FTTx jsou zobrazeny na obrázku 1.6.

- **FTTN** (Fiber To The Node), optické vlákna jsou zakončená v uzlu, který je umístěn několik stovek metrů až desítek kilometrů od koncové jednotky. Z tohoto uzlu jsou dále vedené metalické přípojky až ke koncovým jednotkám. K uzlu jsou uživatelé připojeni přípojkami xDSL, nejčastěji VDSL s přenosovou rychlost 25 až 50 Mbps v sestupném směru a 2 až 10 Mbps ve vzestupném směru.
- **FTTC** (Fiber To The Curb), optické vlákna jsou přivedena k účastnickému rozvaděči, k němuž jsou koncové jednotky připojeny metalickými kabely. Oproti variantě FTTN se optické vedení více přiblíží uživatelům. Jedná se o vzdálenost do 300 metrů. Toto řešení umožňuje použít VDSL2, která poskytuje rychlost 50 až 100 Mbps v sestupném směru a 5 až 15 Mbps ve vzestupném směru.
- **FTTB** (Fiber To The Building), přivádějí optická vlákna až do suterénu budovy účastníka, ti jsou následně připojováni pomocí vnitřních účastnických rozvodů. Tato varianta se využívá pro připojení větších budov. Dosahuje rychlosti až 1Gbps v obou směrech (sestupný i vzestupný).

- **FTTH** (Fiber To The Home), obdobně jako u FTTB je optické vlákno přivedeno do budovy s tím rozdílem, že se vlákno připojí až ke koncovým bodům sítě, tj. až na účastnické zásuvky.
- **FTTO** (Fiber To The Office), je čistě optické řešení. Zde jsou optické vlákna zavedena do kanceláře důležitých zákazníků s velkými nároky na přenosovou kapacitu. Dokáže poskytnout společně s variantou FTTH nejvyšší přenosovou rychlost 50 až 100 Mbps [20].



Obrázek 1.6: Optické přístupové sítě FTTx [5].

2 Pasivní optické přístupové sítě

Pasivní optická síť PON (Passive Optical Network) využívá k distribuci signálu k účastníkům pasivní rozbočovač (splitter), který také funguje i v opačném směru (slučuje signály od účastníků). Rozbočovač pouze rozdělí optický signál do požadovaného počtu dílčích směrů, neprovádí žádné zesílení signálu ani jiné úpravy. Každá ukončující jednotka ONU obdrží kompletní multiplexovaný signál od linkového zakončení OLT a vybere z něj pouze jí příslušející kanál.

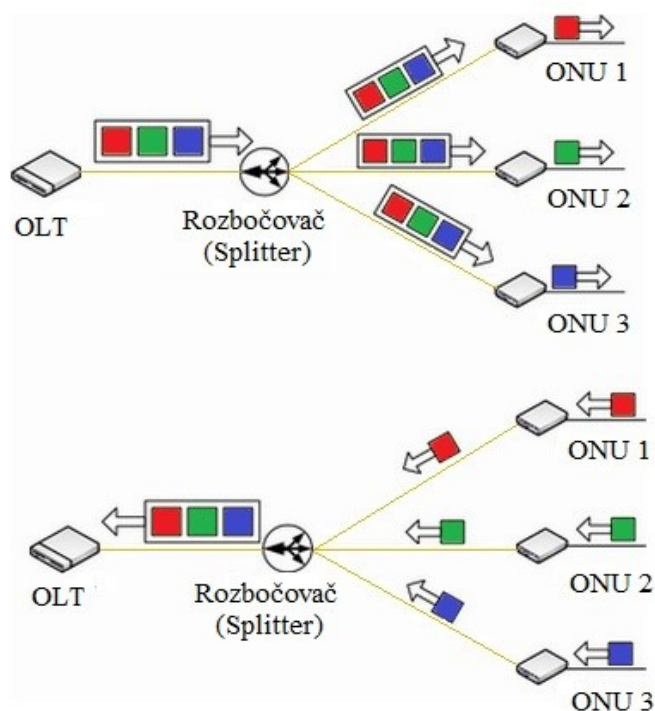
Při výstavbě pasivních optických sítí se nevyužívají aktivní prvky, díky tomu se sníží celkové náklady. Avšak oproti sítím aktivním AON (Active Optical Network) při návrhu topologie sítě ODN je limitujícím faktorem maximálně přípustná délka optické cesty mezi OLT a nejvzdálenější ONU. Proto k přenosu signálu dochází na krátké až střední vzdálenosti (tzn. v rámci stovek metrů až desítek kilometrů).

PON sítě se pro domácnosti většinou používají v mnohabodovém uspořádání pomocí vícestupňové hvězdy neboli stromová topologie (Tree), pro obchodní využití může mít chráněnou kruhovou topologii (Ring) a pro univerzitní účely sběrníkovou topologii (Bus). Hvězdicové uspořádání (Star) je málo využívané.

2.1 Princip přenosu

Přenos dat u pasivních optických sítí je nejčastěji realizován pomocí P2MP topologie. Z centrální jednotky OLT vede jedno vlákno do pasivního optického rozbočovače, který rozdělí signál a ten dále pokračuje ke koncovým uživatelům (16 až 128 koncových uživatelů). Výrazně se nám sníží počet potřebných optických vláken k sestavení optické trasy.

Přenos signálu v sestupném směru je jednoduchý, z centrální jednotky OLT je přenášen optický signál ve formě časového multirámce, který obsahuje přenášené data všech koncových jednotek ONU. Koncová jednotka po převzetí multirámce si vybere data jí určené (riziko odposlechu). V opačném směru, kdy se data posílají od uživatele k poskytovateli je přenos komplikovanější. Jelikož se vlákna spojují s ostatními vlákny, tak aby nedocházelo ke kolizím, je třeba zajistit správné seřazení příchozích dat. Tohoto dosáhneme při použití časového multiplexování **TDM** (Time Division Multiplex), jedná se o časové dělení. Centrální jednotka OLT vymezí časový rámec pro jednotlivé koncové jednotky, které vysílají v přiděleném čase jen určité množství dat. Princip přenosu v sítích PON je zobrazen na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: *Princip přenosu.*

2.2 APON

Pasivní optická síť APON (Asynchronous Transfer Mode PON) byla prvním standardem pro PON, schváleným organizací ITU-T G.983, v roce 1998. Jedná se o síť založenou na buňkovém přenosu ATM ve dvou podporovaných přenosových módech:

- symetricky s rychlostí 155,52 Mbps v obou směrech (upstream a downstream),
- asymetricky s rychlostí 155,52 Mbps ve zpětném směru od uživatele (upstream) a rychlostí 622,08 Mbps ve směru k uživateli (downstream).

Velkou výhodou této technologie je nativní podpora tříd QoS nasazením ATM technologie. Způsob řešení duplexního provozu je shodný s BPON [9].

2.3 BPON

V roce 2001 byl schválen standard ITU-T 983 BPON, jedná se o úpravu technologie APON. Tato technologie zavedla symetrický přenos s rychlostí 622,08 Mbps v obou směrech (upstream a downstream). Komunikace se uskutečňuje buď pomocí separátních vláken pro oba směry přenosu, nebo po jednom vláknu na různých vlnových délkách:

- 1260 až 1360 nm - pro vzestupný směr (upstream).
- 1480 až 1550 nm - pro sestupný směr (downstream).

Oproti APON je podporované vlnové multiplexování WDM, čímž zvětší přenosové pásmo a také se zajistí větší spolehlivost přenosu [9].

2.4 GPON/XG-PON

Technologie je definována standardem ITU-T G.984 z roku 2003. Tato verze navazuje na síť typu BPON a rozšiřuje jí o použití druhé vrstvy. Jedná se o protokoly ATM, Ethernet, GEM – GPON Encapsulation Method). Metoda GEM se používá k přenosu GPON rámců majících proměnnou délku. Rozbočovací poměr určující maximální počet účastníku je v současné době 1:64, perspektivně uvažováno 1:128. GPON umožňuje nasazení vyšších přenosových rychlostí [19]:

- symetricky s rychlostí 1244,16 a 2488,32 Mbps,
- asymetricky s rychlostí 1244,16 a 2488,32 Mbps v sestupném směru (downstream) a s rychlostí 155,22 Mbps, 622,08 Mbps případně 1244,16 Mbps ve zpětném směru od uživatele (upstream).

Technologie GPON využívá tyto vlnové délky:

- 1260 až 1360 nm - pro vzestupný směr (upstream).
- 1480 až 1550 nm - pro sestupný směr (downstream).

Pro specifické účely a instalace GPON byly definovány tři útlumové třídy [1].

Tabulka 2.1: *Útlumové třídy sítě GPON.*

	Rozsah útlumu v [dB]
Třída A	5-20
Třída B	10-25
Třída C	15-30

Třída A je určena pro krátké vzdálenosti a pro malý počet účastníků. Třída B je určena pro střední vzdálenosti. Jedná se o třídu s vyváženým vloženým útlumem a také počáteční náklady na výstavbu jsou přijatelné. Třída C je určena pro dlouhé vzdálenosti. Používá se v sítích s překročeným maximálním vloženým útlumem v třídě B.

V roce 2010 XG-PON (X Gigabit PON) bylo standardizováno dle ITU-T G.987. Existují dvě varianty XG-PON, přičemž XG-PON1 nabízí asymetrické připojení o rychlosti 10 Gbps pro sestupný směr a 2,5 Gbps pro vzestupný směr, nebo symetrické XG-PON2 o rychlosti 10 Gbps v obou směrech.

2.5 EPON/10GE PON

Pasivní optická síť založená na přenosu rámců Ethernet, která se označuje jako EPON (Ethernet PON) někdy i jako GEPON (Gigabit EPON). Oproti normám stavějících na standardech APON, BPON a GPON není produktem organizace ITU. Technologie EPON produktem organizace IEEE. Přesněji se jedná o standard IEEE 802.3ah. Základem úspěchu EPON je použití technologie Ethernet na spojové vrstvě.

Optické sítě EPON existují ve dvou typech specifikací rozhraní. První typ se už moc nevyskytuje. Má označení 1000 Base-PX10. Druhý typ se označuje 1000 Base-PX20. Oba typy odlišuje překlenutelná vzdálenost a rozbočovací poměr. První typ podporuje rozbočení až 1:16 a maximální vzdálenost mezi OLT a ONU 10 km. Druhý typ podporuje rozbočení až 1:32 a vzdálenost mezi OLT a uživatelem může činit až 20 km.

EPON nabízí pouze symetrickou variantu přenosu a to s rychlostí 1,25 Gbps. Rozdělení vlnových délek pro přenos Ethernetových rámců je pro jednotlivé směry následující:

- 1260 až 1360 nm - pro vzestupný směr (upstream).
- 1480 až 1550 nm – pro sestupný směr (downstream).

Výhodou použití Ethernetu v přístupové síti je jeho snadné začlenění do transportních sítí, kde se často uplatňuje SDH. Zapouzdření Ethernetu do rámců zpřístupní využití stávající infrastruktury. Nevýhodou Ethernetu je absence implementace QoS, nepodporování tradičních služeb TDM a nezajišťování šířky pásma.

Generace 10GEPON je definována standardem IEEE 802.3av. Umožňuje symetrickou přenosovou službu 10 Gbps a nebo asymetrickou, kde je rychlost ve vzestupném směru omezená na 1 Gbps a v sestupném směru zůstává na hodnotě 10 Gbps [19].

2.6 Porovnání parametrů jednotlivých PON sítí

Tabulka 2.2: *Porovnání parametrů jednotlivých PON sítí[9].*

Varianty PON	APON	BPON	GPON	GEAPON	10GEAPON	XG-PON1
Standard	ITU-T G.983 (1998)	ITU-T G.983 (2001)	ITU-T G.984 (2003)	IEEE 802.3ah (2004)	IEEE 802.3av (2009)	ITU-T G.987 (2010)
Varianty přenosových rychlostí	0,15G/ 0,15G symetrická	0,6G/0,6G asymetric- ká	1,25G/1,25G symetrická	1G/1G symetric- ká	10G/10G symetrická	10G/2,5G nesymetric- ká
	0,6G/0,15G asymetric- ká		2,5G/1,25G nesymetrická		10G/1G asymetric- ká	
			2,5G/2,5G symetrický			
Přenosová rychlost na fyzické vrstvě	155,52 Mbps	622,08 Mbps	1,244 Gbps	1,25 Gbps	10,312 Gbps	9,953 Gbps
	622,08 Mbps		2,488 Gbps		1,25 Gbps	2,488 Gbps
Vlnové délky [nm] – sestupný směr	1480-1500	1480-1500	1480-1500	1490 ± 10	1575-1580	1575-1580
Vlnové délky [nm] – vzestupný směr	1260-1360	1260-1360	1260-1360	1310 ± 50	1260-1280	1260-1280
Protokol na druhé vrstvě	ATM	ATM	ATM, GEM	Ethernet	Ethernet	XGEM
Maximální rozbočovací poměr	1:32	1:32	1:64 (perspektivně 1:128)	1:32	1:32	1:256
Dosah [km]	≤ 20	≤ 20	≤ 20	$\leq 10, \leq 20$	$\leq 10, \leq 20$	$\leq 20, \leq 40$
Útlumové třídy	Třída A	Třída A	Třída A	PX10	PR10, PRX10	Nominal 1
	Třída B	Třída B	Třída B (B+)		PR20, PRX20	Nominal 2
	Třída C	Třída C	Třída C	PX20	PR30, PRX30	Extended 1
						Extended 2

3 Sítě nové generace NGA

Před pár lety byly telekomunikační sítě tvořeny dvěma samostatnými typy sítí. Jednalo se o klasické telefonní sítě, které nám sloužili pro přenos hovorového signálu. Druhým typem byly datové sítě, určené pro přenos dat. Tyto sítě se vyvíjely odděleně, nezávisle na sobě.

Telefonní sítě jsou obecně označovány zkratkou PSTN (Public Switched Telephone Network). Pracují na principu časového dělení TDM. Kanály pro jednotlivé uživatele jsou vysílány opakovaně po sobě a na principu spojování okruhů. Jedná se o rezervaci spojení mezi účastníky po celou dobu jeho trvání. Postupem času se analogové sítě změnily na digitální sítě ISDN (Integrated Services Digital Network). Tyto sítě jsou primárně určené pro přenos telefonního signálu, ale také nabízí službu pro přenos videa, textu, dat a obrazu.

Na rozdíl datové sítě byly od počátku vyvíjeny pro elektronický přenos dat. Na začátku se vyvíjeli samostatně jako lokální sítě. Poté byly propojovány přes telefonní síť pomocí modemů. Avšak byl velmi rychlý, tak došlo k přímému propojení jednotlivých sítí do jedné celosvětové datové sítě - Internetu.

Hlavní výhodou datové sítě oproti telefonní je paketový přenos. Uživatelem posílaná nebo přijímaná data jsou uložena do paketů a přenášena sítí. Jestliže do sítě nejsou posílány žádné data, tedy že je přenosové médium volné, může ho využít jiný uživatel. U telefonních sítí se vytváří spojení, které je udržováno po celou dobu hovoru. A to i ve chvíli, kdy není přenášén žádný užitečný obsah a tím je blokován kanál pro ostatní uživatele.

Sloučení vlastností těchto dvou sítí a využití výhod obou nám vzniká síť nové generace NGN (Next Generation Network). Tyto sítě jsou založené na paketovém přenosu, pomocí kterého poskytují řadu telekomunikačních služeb (telefonní, textové, obrazové, video a data) [11]. Vývoj pasivních optických sítí je zobrazen na obrázku 3.1.

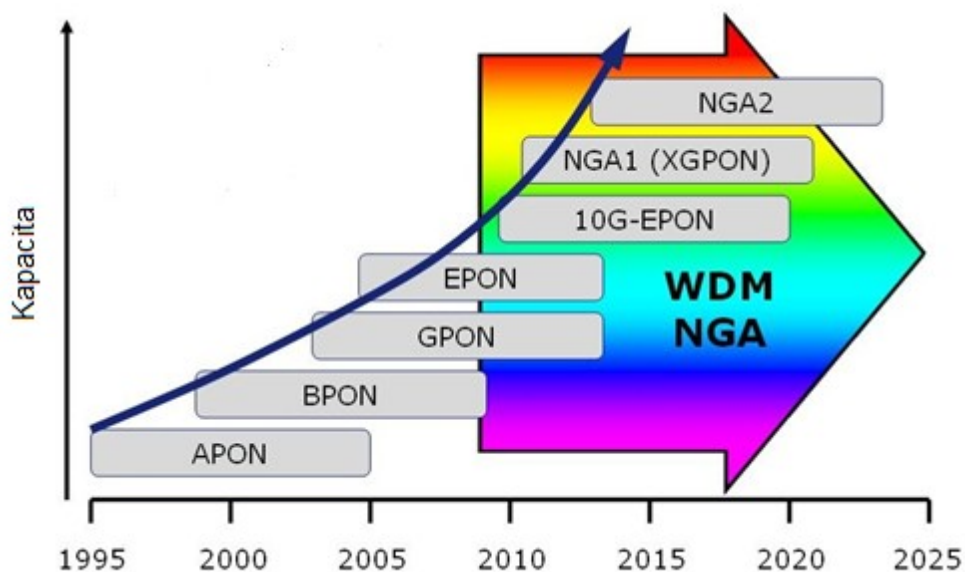
Definice NGN dle ITU-T Y.2001 (z prosince 2004), [13]:

„NGN je paketově orientovaná síť schopná poskytovat telekomunikační služby a zajistit přístup k širokopásmovým přenosovým technologiím umožňujícím QoS, ve které služby nejsou vázány na použité transportní technologie. NGN poskytuje uživatelům neomezený přístup k poskytovatelům služeb, podporuje mobilitu uživatelů a umožňuje jim zajistit trvalé a všestranné dostupné služby.“

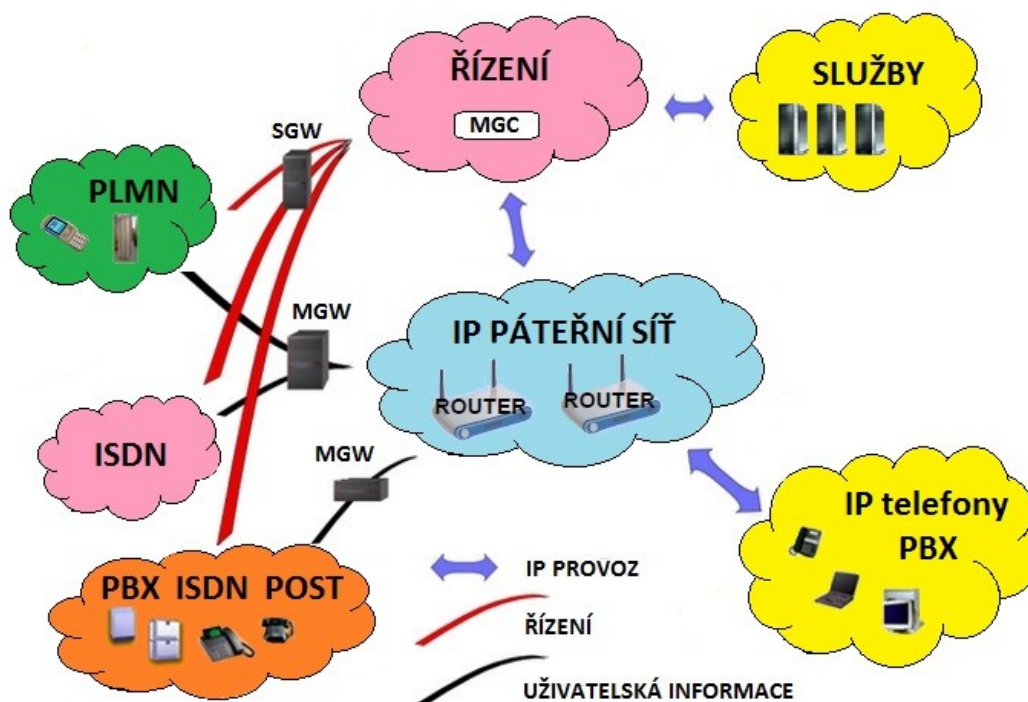
3.1 Architektura NGA

Architektura se skládá s tři hlavních domén. První doménu tvoří aplikační servery, které zajišťují dodávku služeb (označované jako IP Multimedia Subsystem - IMS). Tato doména je připojena do páteřní IP sítě. Druhou doménou je řízení, které využívá spolehlivé servery (softswitch). Tyto servery jsou rovnoměrně rozloženy v síti. Poslední doména je přenosová část sítě, která je realizována IP technologií.

Architektura NGN obsahuje kromě tří zmíněných domén také brány (Gateway), které nám zajistí zpětnou kompatibilitu dnešními sítěmi pracujícími na bázi časového dělení TDM a spojování okruhů (ISDN, PLMN). Existují dva typy bran. Brána MGW (Media Gateway) slouží pro převod uživatelské informace a konverzi kódování. Druhý typ brány je pojmenován SGW (Signalling Gateway). Převádí signalizace paketových sítí (SIP, H.323) na signalizace telefonních sítí (SS7, ISDN). Řídící prvky MGC (Media Gateway Controller) koordinují činnost celého systému [11]. Celá architektura NGN je zobrazena na obrázku 3.2.



Obrázek 3.1: Vývoj pasivních optických sítí [18].



Obrázek 3.2: Architektura NGN [11].

3.1.1 NGA1

FSAN (Full Service Access Network) a ITU-T zavedli první generaci NGA (New Generation Access). Jedná se o okamžitou aktualizaci stávajících optických sítí, zatímco druhá generace je dlouhodobé řešení v PON evoluci. Z hlediska nákladů na výstavbu přístupové sítě jsou totiž nejvíce nákladné optické distribuční sítě ODN. Představují až 70% celkové investice. Proto hlavním požadavkem na NGA1 je soužití s nasazenými GEAPON systémy [10].

3.1.2 NGA2

Druhá generace NGA bude především založena na vlnovém multiplexu WDM. Vytvoření hybridních WDM-TDM PON, která poskytne přenosové rychlosti až 40 Gbps a zvýšení počet poměru kanálů. Ovšem za cenu zcela nového návrhu a koncepce bez možnosti zpětné kompatibility s předchozími generacemi sítí [14].

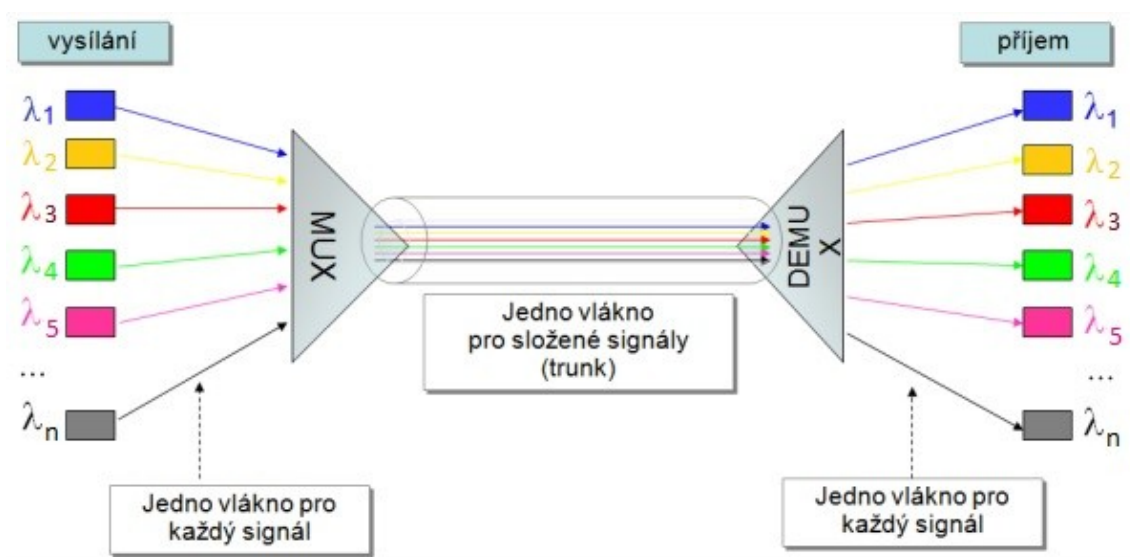
3.2 WDM-PON

V posledních letech byla většina nasazení FTTH založených na standardních technologiích GPON a EPON. Čistě pasivní optické sítě založené na časovém dělení TDMA se již postupně blíží z pohledu přenosových parametrů k pomyslné výkonnostní hranici. Proto vznikla technologie WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-PON), která nám poskytuje nadstandardní výkon a flexibilitu, nezbytnou pro rychlý rozvoj multimediálních služeb náročných na přenosové rychlosti, propustnost a celkovou výkonnost přístupových sítí.

WDM-PON je další generace optických přístupových sítí, která bude využívat přenos pomocí vlnového multiplexování, který nám umožní umístění většího množství oddělených vlnových délek do společného vlákna. Při kombinaci vlnového dělení s časovým, budeme moci dosáhnout maximálních přenosových rychlostí. Tato technologie se nazývá WDM-TDM PON, neboli hybridní optické přístupové sítě [7].

3.2.1 Vlnový multiplex

Dříve bylo možné použít optické vlákno pouze k jednomu přenosu, tedy všemi „barvami“ současně. Dnes díky technologii WDM (Wave Division Multiplex) může být každá barva přenášena samostatně po jednom vlákně. Barvu chápeme jako jednotlivý přenosový kanál, který může přenášet samostatná data. Dokonce i v opačném směru, tudíž optické vlákno se stává obousměrné. Základní princip vlnového dělení ukazuje obrázek 3.3.



Obrázek 3.3: Vlnový multiplex [12].

3.2.2 Výhody a nedostatky WDM-PON

WDM-PON nabízí tyto výhody [6]:

1. Optické rozbočovací zařízení je stále pasivní a proto má stejně nízké nároky na údržbu a vysokou spolehlivost vlastností jako u PON sítí.
2. Každému uživateli je přidělena vlastní vlnová délka. Proto WDM-PON nabízí vynikající soukromí.
3. Zajišťuje P2P spojení mezi OLT a ONU a nevyžaduje P2MP ovladače přístupových médií. Tím výrazně zjednodušuje MAC vrstvu.
4. Každá vlnová délka je účinné P2P spojení, umožňující používání jiné přenosové rychlosti a jiné protokoly pro jednotlivé spojení.

Mezi nedostatky WDM-PON patří:

1. Vysoké náklady na WDM komponenty. Vyžaduje se složitější OLT a ONT, což je cenově velmi nákladné.
2. U WDM-PON každý ONU potřebuje jinou vlnovou délku pro vzestupné (upstream) připojení. To představuje poměrně vážné provozní problémy a řízení výrobních linek, stav zásob a údržbu.

3.2.3 WWDM

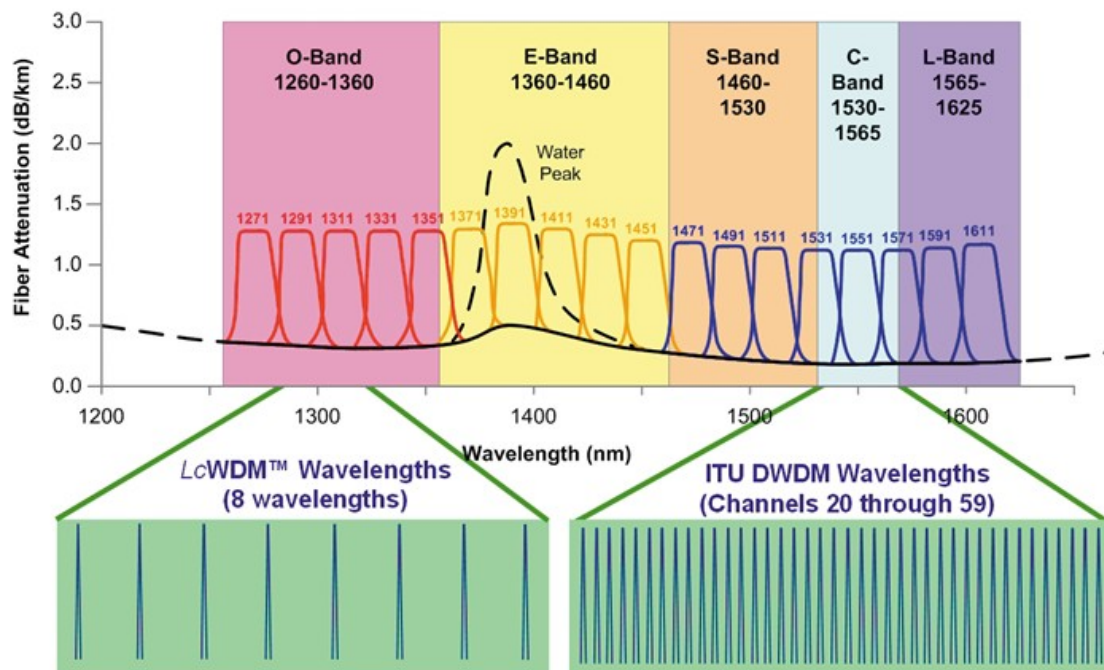
Technologie WWDM (Wide Wavelength Division Multiplex) patří mezi starší techniky a je označována jako „široký“ vlnový multiplex. Avšak i dnes je stále využívána z důvodů nízkých nákladů pro vytvoření optické sítě. Vlnový multiplex WWDM se nejčastěji využívá pro přenos Gbps a 10Gbps Ethernetu. Technologie používá pouze vlnové délky kolem 1310 nm s odstupem jednotlivých vlnových délek 20 nm.

3.2.4 CWDM

Technologie „hrubý“ vlnový multiplex CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) se objevuje jako robustní a ekonomické řešení oproti DWDM. Zaměřuje se hlavně na metropolitní síť. Vlnové délky specifikuje doporučení ITU-T G.694.2 s první nosnou 1270 nm. Odstup kanálů je 20 nm s tolerancí nosné $\pm 6,5$ nm. Větší odstup kanálů je nutný z důvodů značné závislosti vysílané vlnové délky na teplotě (méně kvalitní provedení a levné zdroje záření pro přístupovou síť), která může kolísat podle teploty prostředí [3].

Technologie CWDM vysílá na jednom vlákně až 16 kanálů rozdělených do následujících pásem [7]:

- **pásma O (Original)**: vlnové délky 1260-1360 nm, nosné číslo 1-5,
- **pásma E (Extended)**: vlnové délky 1360-1460 nm, nosné číslo 6-10 (počítá se s optickým vláknem s potlačenými ionty OH⁻, v obrázku 3.4 naznačeno čárkovaně),
- **pásma S (Short)**: vlnové délky 1460-1530 nm, nosné číslo 11-14,
- **pásma C (Conventional)**: vlnové délky 1530-1565, nosná číslo 15,
- **pásma L (Long)**: vlnové délky 1565-1625 nm, nosné číslo 16-18.



Obrázek 3.4: CWDM a DWDM definované dle ITU-T G.694.2 [4].

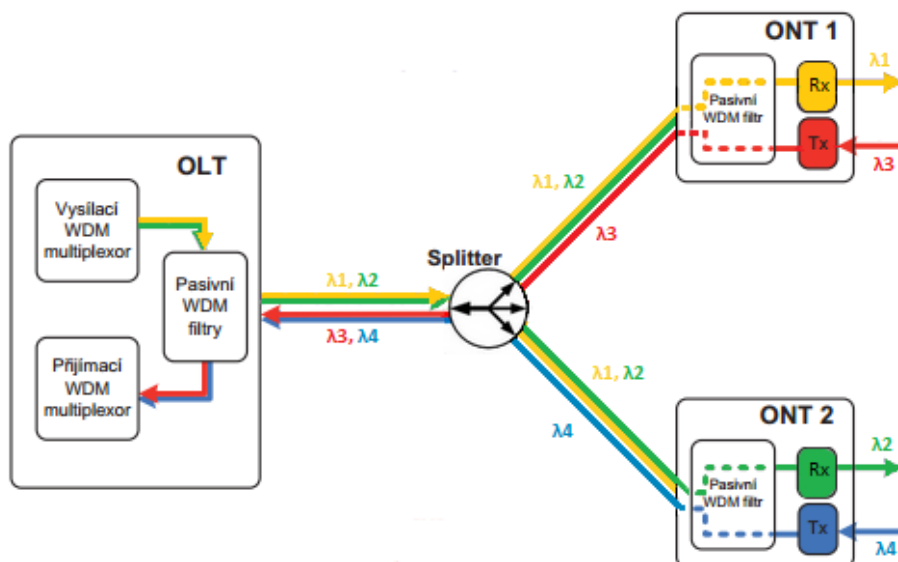
3.2.5 DWDM

Technologie „hustý“ vlnový multiplex DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) patří mezi nejdokonalější systémy, které se v optoelektronice používají. Základem je husté vlnové dělení v pásmu C a L, které dokáže pracovat v minimálním rozestupu kanálu, jako jsou 0,8 nebo 0,4 nm. Pro dálkové a pátevní optické spoje pásma C, L a S s rozestupem nosných 0,4 nm. Tyto systémy musí mít k dosažení tak jemných odstupů, jako je 0,4 nm bez nutnosti zesílení signálu, co nejideálnější podmínky. Proto DWDM pro svou funkci vyžaduje vysoce stabilní vlnovou délku zdroje a přesné optické filtry. Také je důležitá tepelná stabilizace, aby se zabránilo krytí vlnových délek. Tímto celkové náklady na provoz rostou a jsou mnohem větší než u technologie CWDM [3].

3.2.6 Varianty WDM-PON

První varianta WDM-PON používá klasický pasivní rozbočovač (splitter), ten přidělí vlnové délky individuálně všem koncovým jednotkám ONU/ONT. V sestupném směru je světlo rozděleno. Například při připojení 16 koncových jednotek do optické sítě, budou v tomto směru použity vlnové délky λ_1 - λ_{16} . Všechny 16 vlnových délek se pošle ke koncovým jednotkám ONT/ONU, které mají pevně definované vlnové filtry. Pomocí těchto filtrů si vydělí ze všech přichozích vlnových délek (λ_1 - λ_{16}) pouze tu část optického světla, která patří právě jemu. Ve vzestupném směru mají jednotky přidělenou svou vlnovou délku, na které vysílají (viz. Obrázek 3.5). Jednotky ONT bývají naladěné ještě na jednu společnou vlnovou délku, která slouží pro vysílání broadcastu.

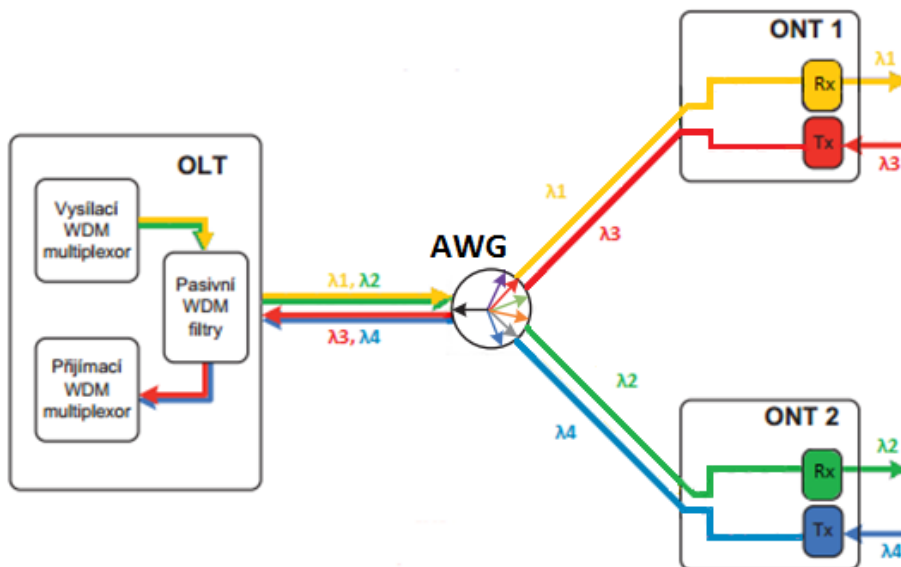
Nevýhodou této koncepce je snadná možnost odposlouchávání provozu, je proto nutné použít šifrování. Vysoký vložný útlum způsobený pasivním rozbočovačem v distribuční optické síti. Dále nemohou být použity univerzální jednotky. Musí být k dispozici tolik různých jednotek (na různých vlnových délkách – zdroj, filtr), kolik je různých uživatelů. Další nevýhodou je špatné hospodaření s přenosovou kapacitou. V případě že jeden kanál je nevyužit, nemůže být zpřístupněn dalším uživatelům.



Obrázek 3.5: WDM-PON s použitím klasického pasivního rozbočovače [7].

Druhá varianta využívá AWG (Arrayed Waveguide Grating) směrové odbočnice pro vydělování vlnových délek. Centrální jednotka OLT posílá optický signál pro jednotlivé koncové jednotky ONU/ONT, který je ve formě vlnového multiplexu nosných. Na rozdíl od předchozí varianty, kde se posílali k jednotlivým koncovým jednotkám všechny vlnové délky, u této varianty se posílá ke koncové jednotce jen ta vlnová délka, která jí patří. Ve vzestupném směru je princip stejný jako u první varianty. Varianta je zobrazena na obrázku 3.6.

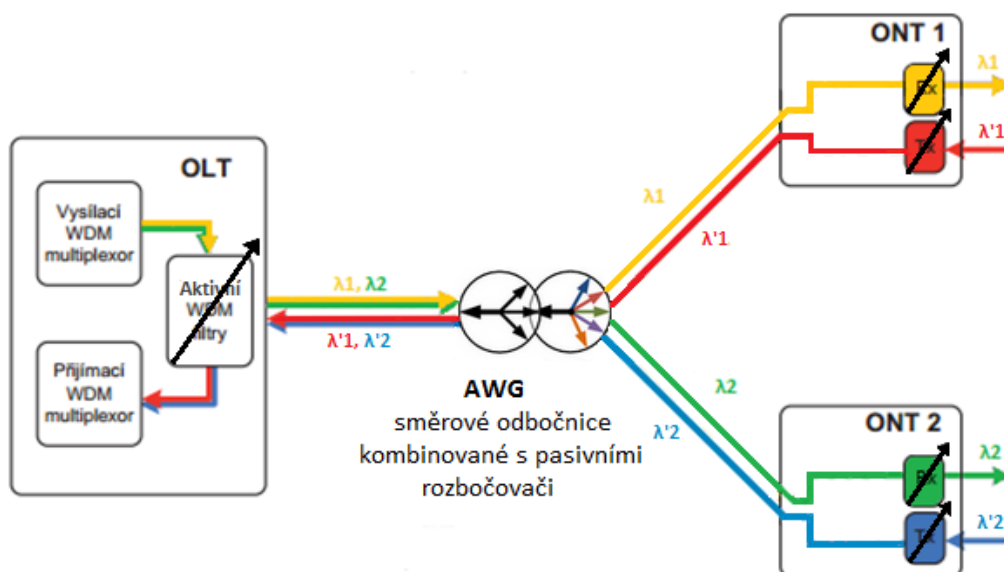
Výhodou této koncepce je, že dokáže jednoduše vydělovat přenášené vlnové délky a odbočovat je na výstup ve formě jednotné nosné. Díky AWG směrové odbočnici se sníží vložený útlum, hodnota útlumu se pohybuje kolem 5 dB nezávisle na počtu rozbočení a počtu vlnových délek. Na vstupu koncové jednotky není potřeba pasivního WDM filtru, které jsou nahrazené DFB lasery, což způsobí další snížení celkového útlumu. Další výhodou je zvýšení bezpečnosti přenosu v sestupném směru.



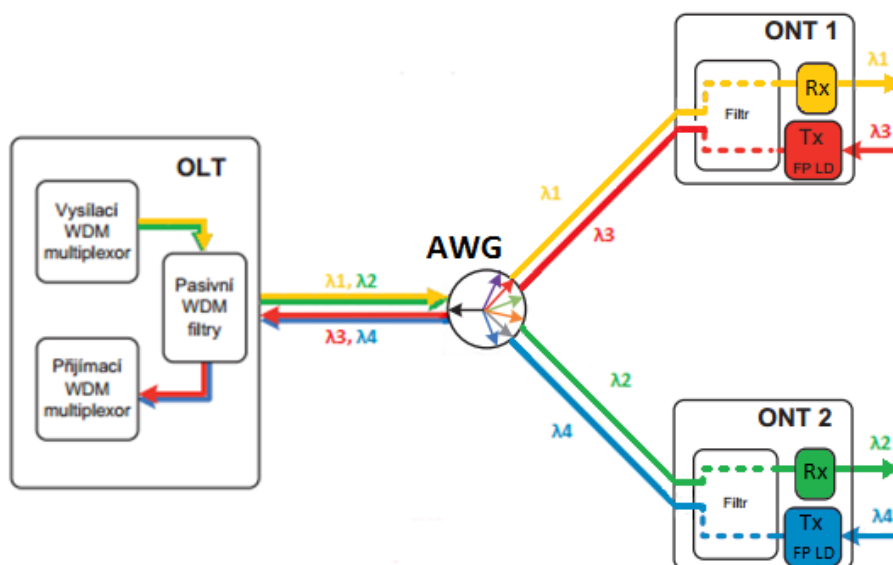
Obrázek 3.6: WDM-PON s použitím AWG směrové odbočnice [7].

Třetí způsob realizace pasivní optické sítě WDM-PON využívá kombinaci AWG směrových odbočnic a pasivních optických rozbočovačů, kde bude k jednotlivým výstupům rozbočovače připojena AWG směrová odbočnice (viz. Obrázek 3.6). Při použití n AWG směrových odbočnic dosáhneme větší přesnosti při vydělování jednotlivých vlnových délek. Možnost použití hustého vlnového multiplexu DWDM. Pomocí přeladitelných filtrů získáme univerzální koncovou jednotku, která umožňuje přidělovat vlnové délky podle potřeby. Tento mechanismus nazýváme jako DWA (Dynamic Wavelength Assignment).

Poslední varianta pasivní optické sítě WDM-PON také využívá AWG směrové odbočnice, ale s rozdílem použití odlišných koncových jednotek ONT (viz. Obrázek 3.8). Tyto koncové jednotky používají Farby-Petrovi lasery, které jsou opticky zavěšené na stimulační vlnové délce přicházející od směrové odbočnice AWG. Světelný paprsek nejprve projde filtrem koncové jednotky, kde se pro příchozí směr oddělí signál, který dále pokračuje do přijímací části. Zbytek světelného paprsku pokračuje přes filtr dále do FP laseru. Právě zavěšením FP laseru na stimulační vlnovou délku dojde ke změně jeho spektra. Původní spektrum se skládalo z periodických vln, které se následně změnilo na spektrum s úzkou spektrální čarou. Díky tomu se může FP laser použít jako vysílač v koncové jednotce u WDM-PON.



Obrázek 3.7: Kaskádní zapojení AWG směrové odbočnice a pasivních rozbočovačů [7].

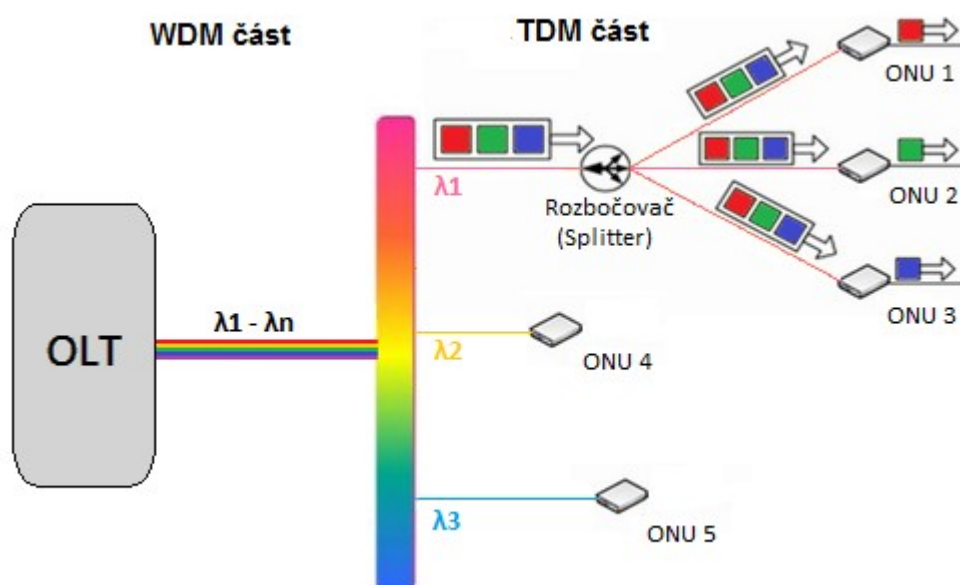


Obrázek 3.8: S využitím FP laseru v ONT.

3.3 Hybridní PON

Jako hybridní PON se označuje kombinace WDM-TDM PON, jedná se o využití vlnového a časového dělení v jedné pasivné optické síti [7]. Spojením těchto dvou technologií dochází k efektivním přenosovým vlastnostem za přijatelné náklady na výstavbu sítě.

Z centrální OLT jednotky se vysílají po jednom optickém vlákne všechny vlnové délky současně, které jsou následně rozděleny pomocí AWG směrové odbočnice do jednotlivých podsítí. Tyto podsítě využívají časový multiplex, pomocí kterého postupně zasílá data ke koncovým uživatelům. Tento princip nejlépe vystihuje obrázek níže.



Obrázek 3.9: Topologie WDM-TDM PON.

3.4 PON s aktivními prvky

Dalším principem použitelným zejména pro zvýšení překlenutelné vzdálenosti a zvětšení rozbočovacího poměru je zařazení aktivních zesilovacích prvků do optické trasy. Již by se nejednalo o čistě pasivné optickou síť, ale na druhou stranu vhodné umístění zesilovacích prvků by umožnilo překlenout vzdálenost až sto kilometrů. Při kombinaci s vlnovým dělením nám poskytne připojení až několik set koncových jednotek v rámci jedné sítě. Jedná se o varianty SPON (Super PON) a L-R PON (Long-Reach PON). Pro potřebné zvýšení citlivosti optických detektorů v koncových jednotkách je potřeba vyměnit dnes nejčastěji používané PIN diody za lavinový fotodetektor APD (Avalanche photodiode).

3.4.1 SPON

Technologie SPON (Super PON) byla navržena k dosažení vyšší překlenutelné vzdálenosti a většímu rozbočovacímu poměru. Oproti běžným PON systémům má větší dosah o více než 20 km při rozdělení 1:64 nebo dokonce 1:128. Pochopitelně při zvýšení těchto parametrů se zvýší také útlum celkové trasy. Aby se tento problém eliminoval, byly do sítě vložené optické zesilovače do obou směrů.

V sestupném směru lze snadno generovat zesílený signál mezi více ONU. Ve směru vzestupném je přenos náročnější, protože optické ukončující jednotky jsou umístěny v různých vzdálenostech s různými ztrátami na optickém zesilovači. Kromě toho, data jsou odesílána v brust režimu, což vyžaduje rychlé přechodné kontrolní funkce na optickém zesilovači.

Technologie Super PON není standardizovaná, ale dá se použít v každé optické síti. Rychlost v sestupném směru vzrostla na 2,5 Gbps. Ve směru vzestupném byla navýšena na 311 Mbps. Využívá časového multiplexu TDM s kombinací vlnového WDM [1].

3.4.2 L-R PON

Při vývoji technologie L-R PON (Long-Reach PON) se klade důraz na využití vysoké přenosové kapacity optického vlákna a celkově malého útlumu.

Optické linkové zakončení (OLT) se nachází na hlouběji v metropolitní síti. OLT jednotka obsahuje dva optické zesilovače pro vzestupný a sestupný směr. Na rozhraní přístupové sítě se nachází místní ústředna, která obsahuje čtyři optické zesilovače a WDM filtr. Maximální vzdálenost mezi OLT jednotkou a místní ústřednou je 100 km. Vlákna jsou vyvedeny z místní ústředny dále ke koncovým uživatelům. Maximální vzdálenost optické distribuční sítě je 10 km.

L-R PON pro svou správnou funkci používá celkem 6 optických zesilovačů pro oba směry, oproti 39 zesilovačům potřebných ve standardu SPON. Výhodou Tato síť má maximální rozbočovací poměrem 1:1024 a symetrickou přenosovou rychlost 10 Gbps.

Místní ústředna je ideálně umístěna před distribuční částí sítě, není potřeba využívat aktivně napájených prvků v distribuční části. Vzhledem k tomu, optické zesílení je směrodatné po rozdělení, nevyužívá zesilovače paralelně zapojené.

L-R PON by neměla být chápána pouze jako fiber-to-the-home aplikace. Může se používat také k poskytování VDSL připojení případně rozhlasové stanice [3].

4 Praktické měření

Praktické měření mé bakalářské práce bylo uskutečněno v laboratoři VŠB-TOU na katedře telekomunikací. Jedná se o praktické nasazení optických přístupových sítí nové generace na topologie stávajících optických přístupových sítích. Z nových generací je použita pasivní varianta WDM-PON, které je nasazená na síť GEAPON.

První použitou topologií je síť GEAPON, která využívá OLT jednotku iMAP 9102. Mezi OLT jednotkou a pasivním rozbočovačem 1:7 je připojená trasa 5,7 km. Na jednotlivých výstupech rozbočovače jsou připojené ukončující optické jednotky ONU (AT-ON1000).

Druhá použitá topologie je síť WDM-PON, která využívá OLT jednotku EAST 1100. Hlavní rozdíl oproti první topologii, je využití směrové odbočnice AWG místo obyčejného pasivního rozbočovače. Dále jsou připojené ukončující optické jednotky ONU (EARU 1112).

Třetí a čtvrtá topologie představuje možnou implementaci WDM-PON technologie na stávající topologii.

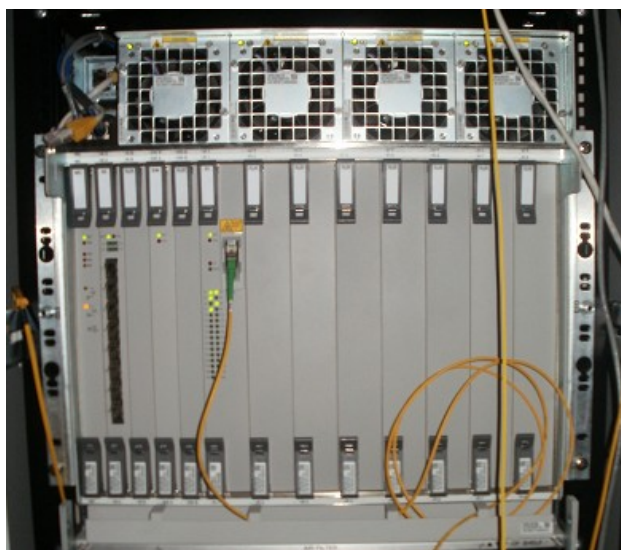
Pomocí spektrálního analyzátoru se ověřila funkčnost navržených topologií. Dále jsou testovány vlastnosti sítí z hlediska primární vrstvy a z hlediska nasazení služby Triple Play. Tyto měření jsou realizovány pomocí standardu RFC2544 (Request for comment) a ITU-T Y.156sam (EtherSAM).

4.1 Popis experimentálního pracoviště

Měřicí pracoviště se nachází v laboratoři přístupových optických sítí na katedře 440 v budově N, učebna N311. Pracoviště je vybavené pro testování technologií GEAPON a WDM-PON. Hlavní Rack (R-A N311) obsahuje aktivní a jako WDM-PON LG-Ericsson EAST 1100 Release3 a GEAPON Allied Telesis model iMAP 9102. Rack dále obsahuje různé pasivní rozbočovače, například AWG Nortel. Rack je spojený s jednotlivými lavicemi pomocí čtyř optických vláken. První dvojice optických vláken je typu G.652D a druhá typu G.657.B3. Vlákná jsou zakončená v lavicích pomocí namontovaných panelů. Jednotlivé panely obsahují dva porty pro rovný (PC) a šikmý (APC) konektor SC. V panelu je také jeden pár portů pro připojení UTP kabelů.

LG-Ericsson, EAST 1100 Release 3

EAST 1100 (Ethernet Access Service Terminal) představuje v přístupové síti centrální OLT jednotku. Je určena pro instalaci do hlavních rozvodů. Modularita zařízení poskytuje snadnou možnost rozšíření kapacity při minimálních nákladech. EAST 1100 je vhodným řešením pro Triple Play služby. Zařízení obsahuje 2 sloty pro L2/L3 switche, které přivádějí konektivitu (NI), 8 slotů pro karty obsluhy koncových zařízení (PI) a jeden slot diagnostickou kartou dohledového systému (SW). Datová komunikace ke každému koncovému zařízení dosahuje rychlostí až 1 Gbps [2]. Centrální OLT jednotka je zobrazená na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: *LG-Ericsson EAST1100.*

Allied Telesis model iMAP 9102

Model 9102 patří do Allied Telesis iMAP rodiny. Obsahuje Ethernet a IP přístupovou platformu pro poskytování služeb (hlasové, video a datové služby). OLT jednotka sítě GEPON je zobrazena na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: *Allied Telesis model iMAP 9102.*

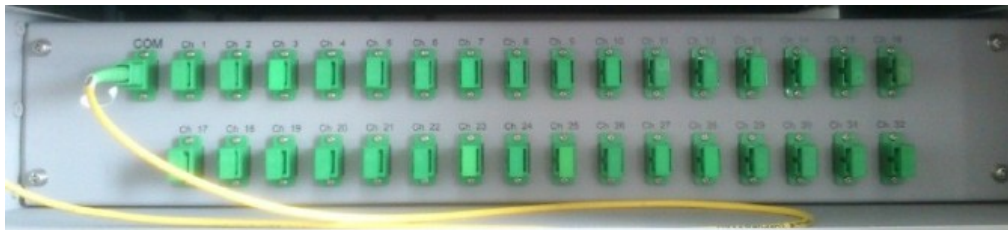
Přední panel obsahuje celkem tři sloty pro instalaci různých modelů účastnických rozhraní. Popis jednotlivých modelu [17]:

- **modul A (CFC12):**
 - D – port Console, E – port OAM, slouží k připojení k PC.
 - F – port GE2RJ, slouží k připojení FastEthernetu.
 - G – port GE4, připojení pomocí SFP modulů.
- **modul B (FX20BX):** modul 20x Ethernet P2P 100Mbps pro optické vlákna zakončené konektorem LC (PC).
- **modul C (TN-118-B):** GEPON modul, optické rozhraní podle IEEE 802.3ah.

LG-ERICSSON WPF 1132C

LG-Ericsson WPF (Wavelength Passive Filter) 1132c slouží pro multiplexování a demultiplexování optického signálu na trase mezi centrální jednotkou OLT a koncovým zařízením ONT. Je pasivní, tudíž nevyžaduje žádné dodatečné napájení. Obecně zvaný AWG

filtr dokáže rozdělit jednotlivé vlnové délky pro každý výstup a vzájemně tyto linky od sebe izolovat. K filtru je možné připojit až 32 koncových stanic [2].



Obrázek 4.3: *LG-Ericsson WPF 1132c.*

LG-ERICSSON EARU 1112

LG-Ericsson EARU (Ethernet Access Residential Unit) 1112 spadají do kategorie koncových zařízení ONU, určené pro domácnost. Jedná se o jednoduché, ale spolehlivé zařízení při nízkém příkonu jednotky. Podpora standardních datových služeb.

Základní specifikace:

- 1x PON rozhraní, 4x FastEthernet port,
- spotřeba energie <10W,
- plně kompatibilní v celém spektru vlnových délek,
- flexibilní možnosti instalace (upevnění na zeď),
- klasifikace služeb na úrovni L2/L3.



Obrázek 4.4: *LG-Ericsson EARU 1112 [2].*

ALLIED TELESIS AT-ON1000 – GEAPON

Koncové zařízení ONU především slouží jako převodník mezi optickou a metalickou částí pro GEAPON síť s možností přenosové rychlosti do 1 Gbps. Podporuje přepínání klientského rozhraní 10/100/1000 pro jednoduché připojení k uživatelským rozhraním. Je určeno především pro distribuci vysokorychlostních datových, hlasových a video služeb. Koncové zařízení ONU je zobrazeno na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5: *Allied Telesis AT-ON1000 – GEAPON [2].*

4.2 RFC 2544

Doporučení RFC 2544 (Request For Comment) vytvořila v roce 1999 organizace IETF (Internet Engineering Task Force). RFC 2544 bylo původně vyvinuto pro potřeby testů v laboratorních podmínkách. I přes své nedostatky, jsou testy RFC 2544 základními testy pro ověření přenosových parametrů síťových prvků a sítí. Na RFC 2544 v dnešní době navazují novější doporučení, například Y.156sam. Měřicí metoda obsahuje – testování propustnosti (Throughput), zatížitelnost (Back-to-Back), ztrátovosti (Frame Loss) a zpoždění (Latency).

Test propustnosti

Cílem měření je zjistit maximální možnou rychlost přenášení datových rámců, aniž by docházelo k jejich ztrátě. Analyzátor vygeneruje určitý počet rámců, které odešle a čeká, kolik rámců se vrátí zpět. Pokud počty rámců souhlasí, vygeneruje větší počet rámců a test opakuje.

Testování zatížitelnosti

Metoda testování vychází z počátečního odeslání bustru (shluku rámců s minimální mezirámcovou mezerou). Poté analyzátor počítá, kolik rámců se vrátí zpět. Pokud počet odeslaných rámců je roven počtu přijatých, zkrátí se mezirámcová mezera a test se opakuje. Test je opakován tolikrát, než dojde ke ztrátě rámců. Dosažené hodnoty těchto testů se průměrují.

Testování ztrátovosti

Měření ztrátovosti částečně vychází z propustnosti. Počáteční nastavení odeslaných rámců je stanoveno na rychlost rovnající se 100% rychlosti rozhraní (media). V dalších krocích je postupně snižována propustnost (vždy o 10%) do té doby, než proběhnou dva úspěšné testy po sobě bez ztráty rámce.

Ztrátovost paketů FLR (Frame Loss Ratio) je definována klasickým vzorcem počtu vyslaných (N_{tx}) a přijatých (N_{rx}) rámců:

$$FLR = \frac{(N_{tx} - N_{rx})}{N_{tx}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Testování zpoždění

Cílem měření je určení doby, po kterou trvá přenos datového rámce od vysílače k přijímači a naopak (Round Trip). V prvním koku je důležité správně určit propustnost pro jednotlivé velikosti rámce. Po té je odeslán datový tok, ve kterém je náhodně vybrán rámeček, který nese informaci o době trvání přenesení rámce od vysílače k přijímači (časová známka 1). Při odeslání datového toku zpět k vysílači se časová známka označí na hodnotu 2 a přidá se informace o době přenášení rámce. Výsledné zpoždění dostaneme odečtením časové známky 2 od časové známky 1. Měření, tak jak je výše uvedeno, se musí opakovat 20x. Výsledná hodnota se určí jako průměr z dvaceti měření v jednotkách ms [15].

4.3 ITU-T Y.156sam (EtherSAM)

V březnu roku 2011 byl přijat nový standard EtherSAM ITU-T Y.156sam Ethernet Service Activation Test Methodology. Slouží pro posuzování správné konfigurace telekomunikační sítě využívající technologii Ethernet. Obsahuje všechny potřebné nástroje pro rychlou a efektivní verifikaci výkonnosti. Pro všechny služby se testuje propustnost, zpoždění, ztrátovost, variabilita zpoždění (jitter). Metodika také nově zavádí podmínky pro testování paralelních datových toků, díky tomu se zrychluje vlastní měření. Obdobně jako u RFC 2544 probíhá měření pro oba směry zároveň (tzn. Round Trip s uzavřenou smyčkou), nebo pro každý směr samostatně. Ověřování přenosových parametrů probíhá ve dvou fázích:

- **Kontrola nastavení síťové konfigurace služeb:** pro každou službu je vykonaný ramp test, kdy jsou sekvenčně generovány 3 fáze velikosti datového toku. První fáze je od minimálního datového toku až po CIR, druhá fáze je mezi CIR a EIR a třetí v pásmu nad EIR. Výsledkem tohoto testu je vhodnost sítě pro danou službu a vhodnost konfigurace CIR a EIR dané služby. Časová náročnost testu je přibližně 1 minuta pro každou službu.
- **Kontrola nastavení parametrů kvality služby QoS:** v testu jsou všechny služby generovány najednou při CIR rychlosti do sítě. Prověří kvalitu služby pro každou definovanou službu a vyhodnotí, zda splňuje SLA (Service Level Agreements) parametry. Délka testu je uživatelsky volená.

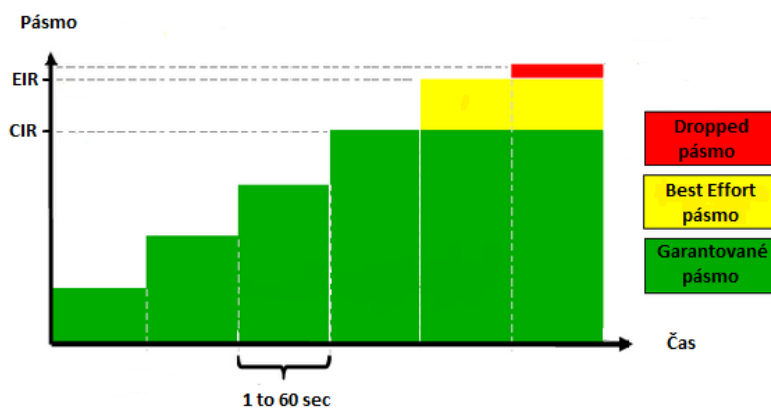
Zákaznický provoz je rozdělen do tří pásem, které jsou barevně označeny. Garantované pásmo je označeno zelenou barvou, žlutá barva značí nadměrný provoz a červená barva značí pásmo kde je vyřazený provoz (viz. obrázek 4.6).

- **CIR (Committed Information Rate):** maximální přenosová rychlost datového toku služby. Do hodnoty CIR jsou přenosové parametry garantovány v definovaných mezích.
- **EIR (Excess Information Rate):** maximální přenosová rychlost služeb, kde již nejsou garantovány všechny parametry přenosu.

Podle těchto dvou hraničních rychlostí je možné definovat celkem tři oblasti (viz. obrázek 4.6).

- **Garantované pásmo** – data přenášena vždy za dodržení SLA parametrů.

- **Best Effort pásmo** – data přenášena v případě, že existuje v síti volná přenosová kapacita. Zde již parametry SLA nemusejí být dodržovány.
- **Dropped pásmo** – v tomto pásmu nejsou data nikdy přenášena. Testuje se do hranice CIR+EIR+25% [16].



Obrázek 4.6: Pásma EtherSAM [16].

4.4 Konfigurace zařízení

Konfiguraci OLT jednotky **MiniMAP 9102** jsem provedl pomocí PC v učebně. Nejprve připojíme PC pomocí sériového kabelu do portu OLT, který nese označení CONSOLE. Spustíme program Putty a nastavíme následující parametry a provedeme spojení:

- Baud rate: 9600 bps, Data bits: 8, Parity: None
- Stop bits: 1
- Flow control: None

Otevře se dialogové okno, kde je nutné vyplnit přihlašovací údaje:

- Name: officer
- Password: officer

Dále pomocí příkazu **show interface** zkontrolujeme přítomnost modulu EPON a číselné označení portů.

Nyní je potřeba nastavit IP adresu pro rozhraní modulu EPON pomocí příkazu:

- **set interface 2.0eponipaddress=192.168.2.10**

Vytvoříme v jednotce OLT připojení ke koncovým jednotkám ONU pomocí příkazu:

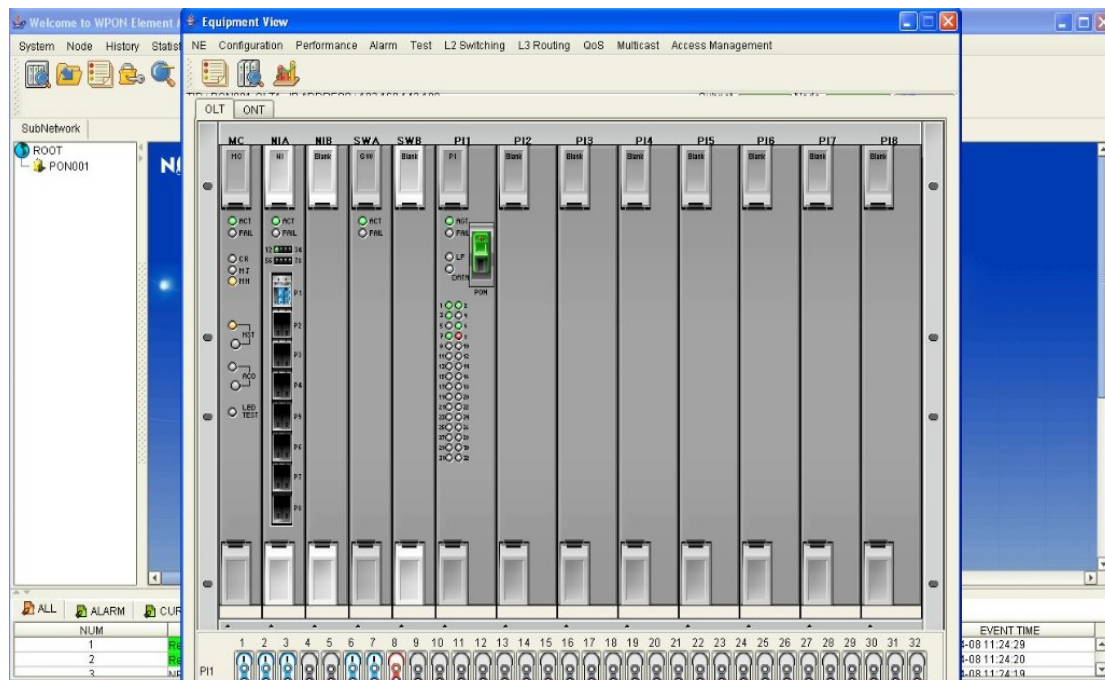
- **create onu <název ONU><onuid v rozsahu 0 až 31><číslo rozhraní EPON><MAC adresa ONU jednotky>**

Pomocí příkazu **show interface <jméno ONU jednotky=název ONU>** zkontrolujeme, zda je ONU jednotka správně zaregistrovaná. Položka state, musí být up-up.

Konfiguraci OLT jednotky WDM-PON (**LG-Ericsson EAST 1100**) je možné provést dvěma způsoby, a to pomocí příkazového řádku nebo přes grafické rozhraní. V mém případě jsem použil variantu s grafickým rozhraním, které je přehlednější a umožňuje jednodušší nastavení všech funkcí OLT jednotky. Nejprve se musí připojit PC pomocí UTP kabelu do portu EMS (Element Management System), který se nachází na přední straně OLT jednotky. Po zapnutí OLT jednotky DHCP server přidělí IP adresu připojenému PC. Je důležité, aby PC byl ve stejné síti. Po získání adresy můžeme na PC spustit software EA Manager. Nejprve se zobrazí přihlašovací okno, kde je nutné vyplnit přihlašovací údaje:

- SERVER IP: 192.168.142.105
- USER ID: admin
- PASSWORD: admin

Server IP je adresa PC, pro doplnění EMS port je na adrese 192.168.142.100. *User id* a *password* jsou uvedené v manuálu přístroje. Po úspěšném přihlášení může začít samotná konfigurace. Nejprve synchronizujeme software s připojenou OLT jednotkou, kliknutím na System→DB Synchronization. Dále v úvodním okně klikneme na ikonu PON001, zobrazí se nám okno se zásuvnými kartami (Equipment View). Zde klikneme pravým tlačítkem myši na modul PI1 a vybereme z nabídky *Configuration* → *Facility*. V okně Facility máme možnost aktivovat jednotlivé koncové jednotky ONU. Dále ve stejném okně – Facility, jsem v záložce OLT Port aktivoval na NI A kartě port P1, který sloužil pro připojení loopback jednotky AXS-200/850. Na obrázku 4.7 je znázorněno okno se zásuvnými kartami (Equipment View) po konečném nastavení.



Obrázek 4.7: *Equipment View* – zobrazení hlavního panelu OLT WDM-PON.

Při testování všech topologií byly použity dvě zařízení, jednak EXFO FTB-1/FTB-860 NetBlazer a loopback jednotka AXS-200/850. Kombinace těchto dvou zařízení je metoda zvaná „*Round Trip*“ neboli testování ve smyčce.

Konfigurace **AXS-200/850**:

- Po zapnutí přístroje se dostaneme do hlavního menu, kde přejdeme do Setup → Interface → Port a nastavíme:
 - Auto-Negotiation – Enabled,
 - Speed – 100Mbps,
 - Duplex – Full,
 - Flow Control – None.
- Přejdeme do Setup → Interface → Network kde nastavíme:
 - DHCP – Disenable (Nefunkční),
 - staticky nastavíme IP adresu, při zapojení loopback jednotky do WDM-PON byla použita adresa **192.168.142.200/24** a u GEPON byla použita adresa **192.168.2.8/24**,
 - Default Gateway – Pro WDM enabled a pro GEPON disenabled.

Nastavená loopback jednotka se pomocí optického kabelu LC/PC připojí k OLT jednotce WDM-PON do portu P1, který jsme si aktivovali. U připojení loopback jednotky do GEPON se používá UTP kabel, který připojíme do portu 4.0 nebo 4.1.

Konfigurace **EXFO FTB-1/FTB-860**:

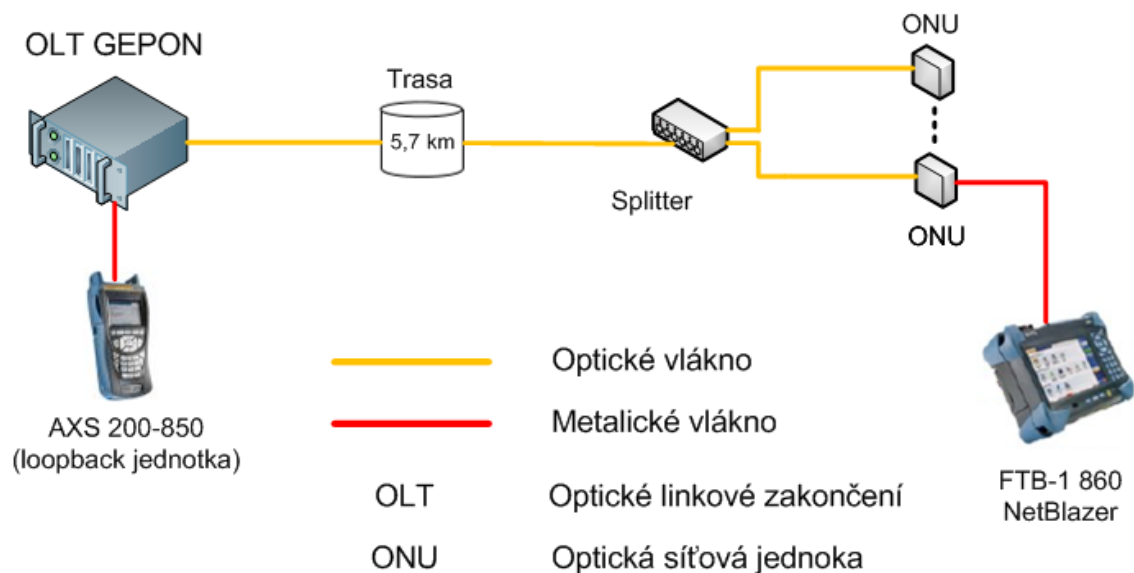
- Pomocí UTP kabelu připojíme NetBlazer k libovolné koncové jednotce ONU.
- Při testování sítě WDM po připojení fungoval DHCP server, který přidělil IP adresu.
- U testování sítě GEPON se nastaví IP adrese staticky, v našem případě **192.168.2.9/24**.

Po úspěšném nastavení IP adres přejdeme na:

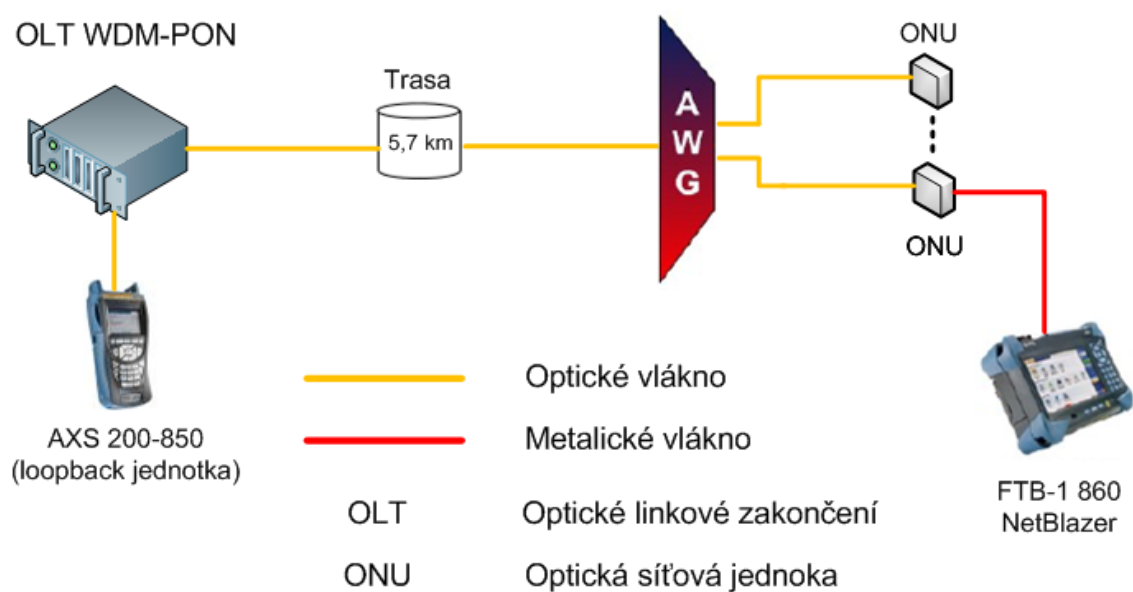
- Discover/Remote – stiskneme Scan Subnet, po chvíli se zobrazí IP adresa loopback jednotky. Nyní můžeme navázat spojení mezi oběma zařízeními, to se provede pomocí Looped Up.
- EtherSAM(Y.156sam) → Interface → Port:
 - Port – Port1,
 - Interface Type – 10/100/1000 Mbps Electrical,
 - Auto-Negotiation – Manual,
 - Speed – 100 Mbps,
 - Duplex – Full,
 - Flow Control – None,
- EtherSAM(Y.156sam) → Interface → Network:
 - DHCP – Enabled(WDM-PON).

4.5 Použité topologie

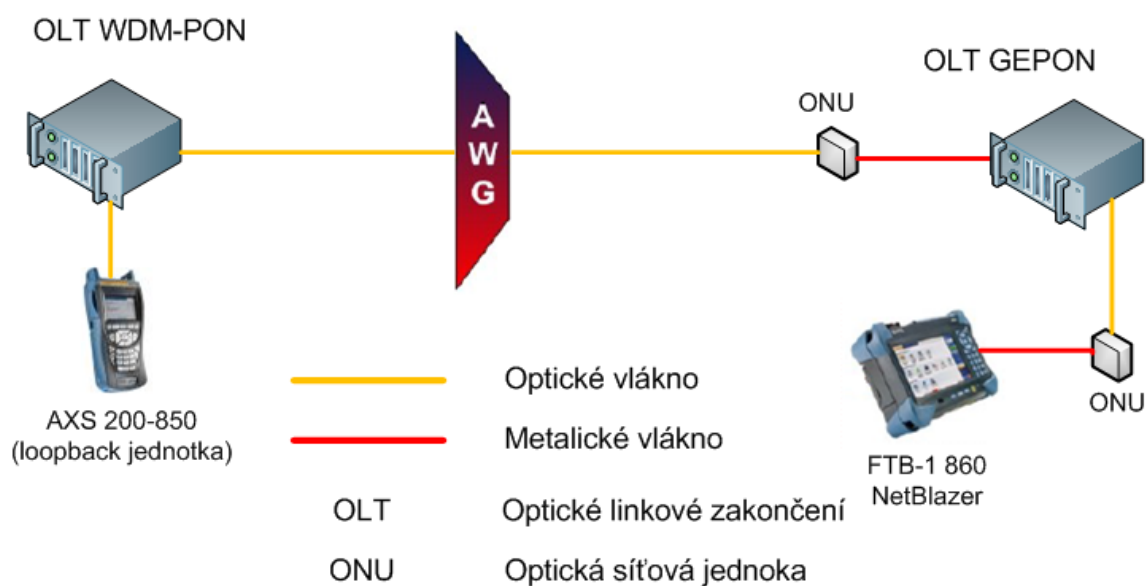
Pro vypracování praktické části bakalářské práce byly použité čtyři topologie, kde pro každou proběhlo měření RFC 2544 a měření Triple Play služeb pomocí standardu EtherSAM (ITU-T Y.156sam).



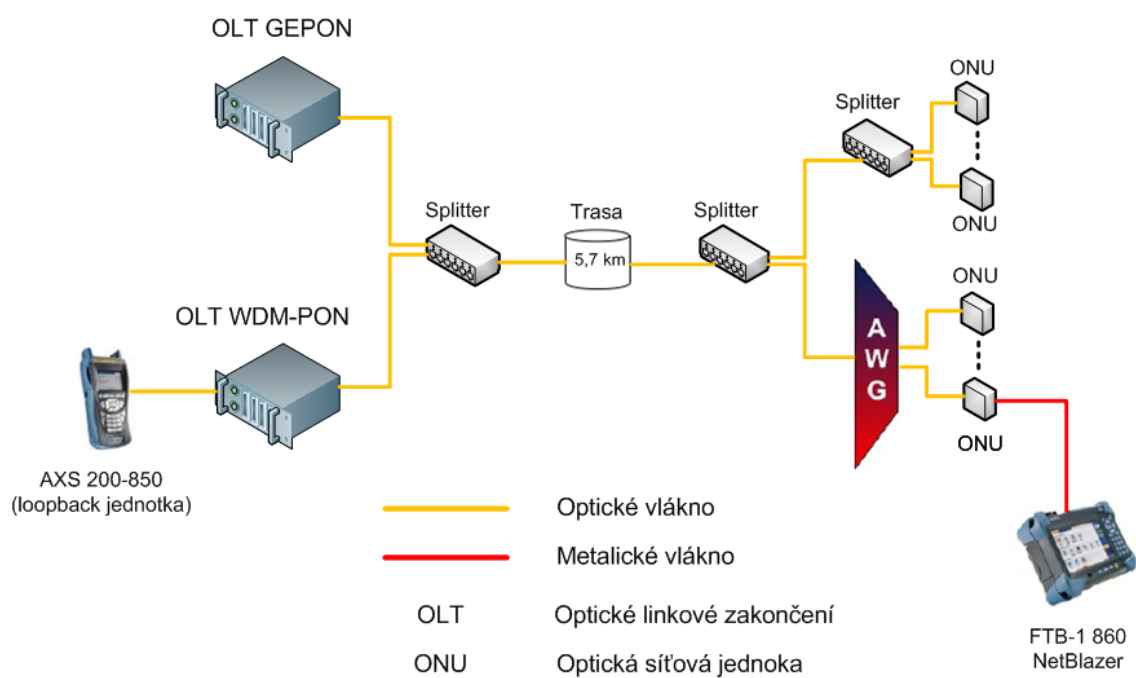
Obrázek 4.8: Topologie GEPON.



Obrázek 4.9: Topologie WDM-PON.



Obrázek 4.10: Topologie WDM & TDM PON.

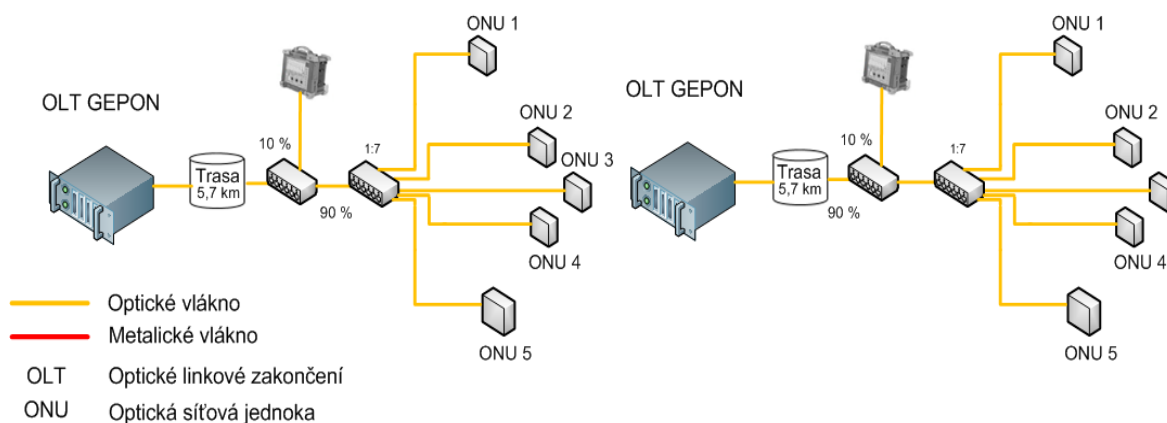


Obrázek 4.11: Topologie GE-PON a WDM-PON na společném vlákně.

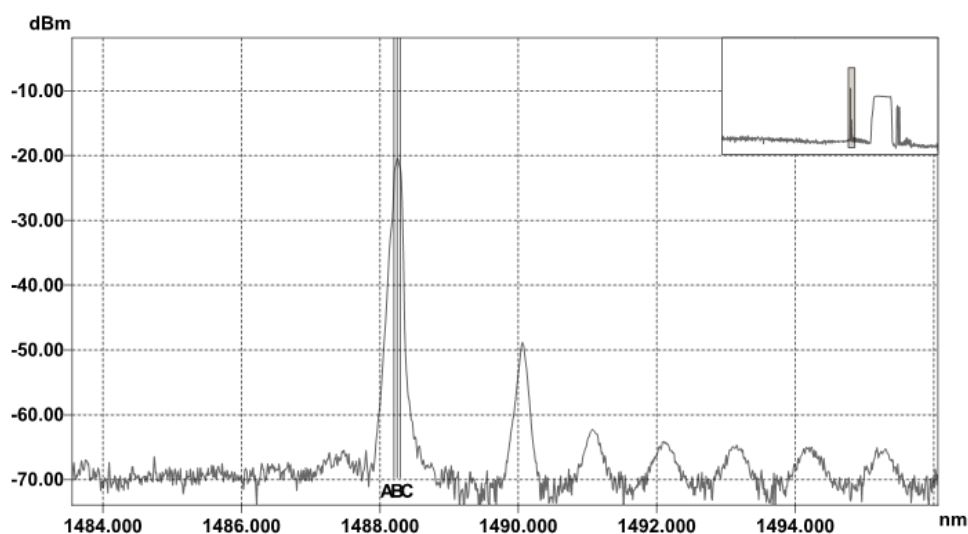
4.6 Spektrální analýza

K spektrální analýze byl využit přístroj společnosti EXFO FTB-5240B. Pro zapojení tohoto zařízení je nutné využít vlnový dělič s poměrem 90:10, kde k 10% je vždy připojena OSA (Optical Spectral Analyzer) aby nedošlo k poškození měřicího přístroje vlivem velké energie z centrální OLT jednotky.

Spektrální analýza GEPON sítě



Obrázek 4.12: Blokové schéma pro měření spektra, downstream(nalevo), upstream (napravo).

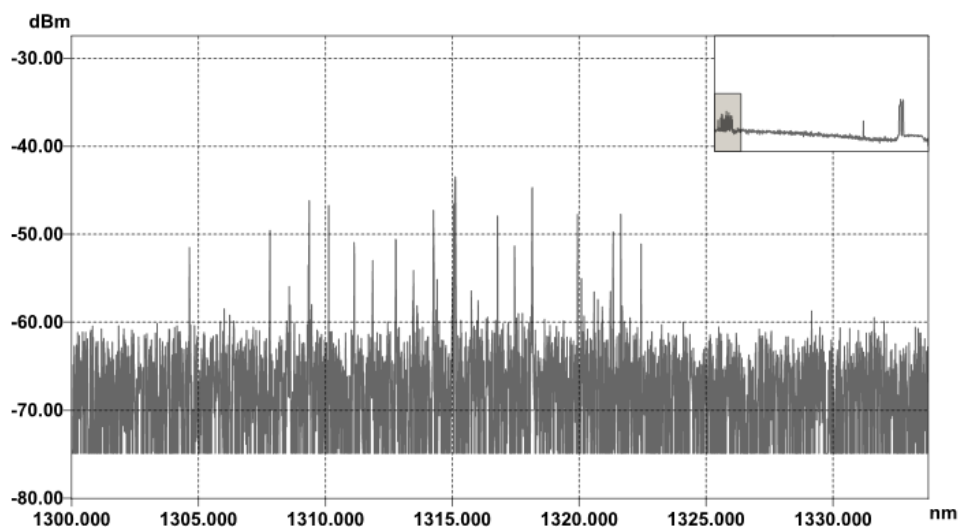


Obrázek 4.13: Optické spektrum ve směru upstream(GEPON).

Tabulka 4.1: *Parametry pro druhý kanál ve směru upstream(GEPON).*

Špička	Kanál	W (nm)	Pp (dBm)	SNR (dB)	Šum (dBm)
1	2	1490,061	-44,26	22,82	-67,08

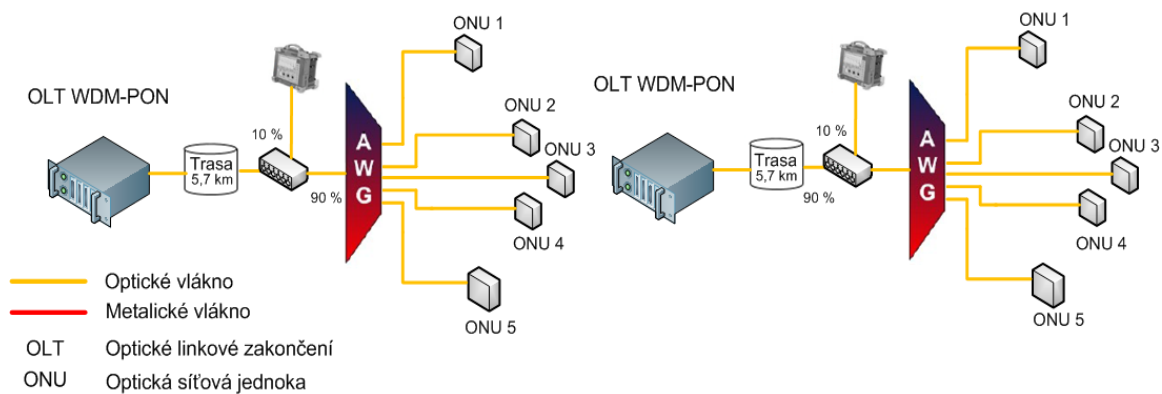
Na obrázku 4.13 je zobrazené optické spektrum ve směru upstream. Z grafu můžeme vidět komunikaci koncové jednotky ONU. Hodnota Pp je pouze 10 % z celkového výkonu. Všechny výsledné parametry jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Obrázek 4.14: *Optické spektrum ve směru downstream(GEPON).*Tabulka 4.2: *Parametry pro jednotlivé kanály ve směru downstream (GEPON).*

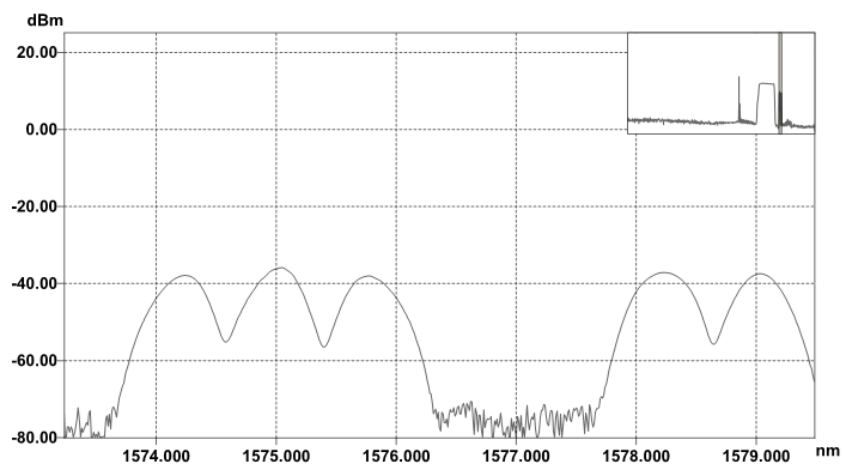
Špička	Kanál	W (nm)	Pp (dBm)	SNR (dB)	Šum (dBm)
1	1	1307,808	-49,63	15,45	-65,09
2	2	1309,359	-46,22	17,02	-63,23
3	3	1310,130	-46,79	17,00	-63,78
4	6	1314,259	-47,35	16,56	-63,91
5	7	1315,061	-46,56	17,31	-63,87

Na obrázku 4.14 je zobrazené optické spektrum ve směru downstream. Z grafu můžeme vidět komunikaci pěti koncových jednotek ONU. Kanály 4 a 5 vykazovaly velký útlum, proto nebyly použity. Hodnota Pp je pouze 10 % z celkového výkonu. Všechny výsledné parametry jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Spektrální analýza WDM-PON sítě



Obrázek 4.15: Blokové schéma pro měření spektra, downstream(nalevo), upstream (napravo).

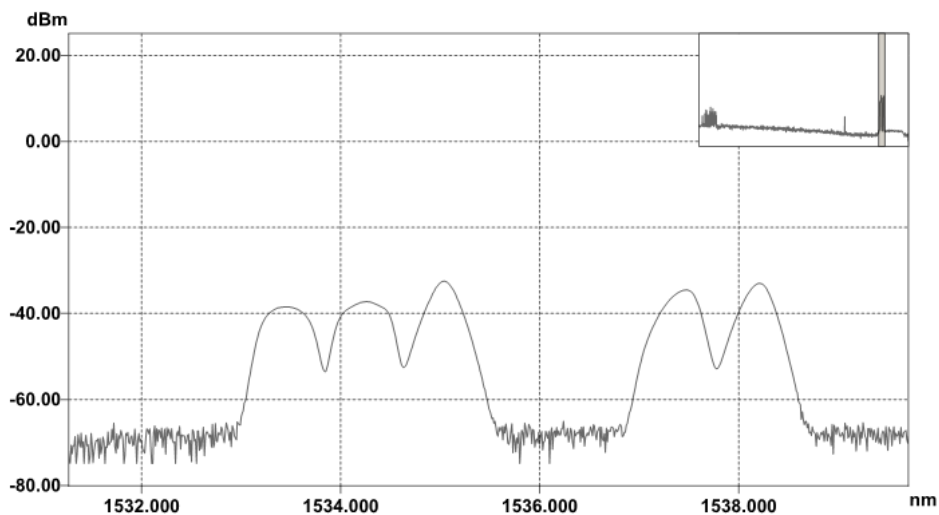


Obrázek 4.16: Optické spektrum ve směru downstream(WDM-PON).

Tabulka 4.3: Parametry pro jednotlivé kanály ve směru downstream(WMD-PON).

Špička	Kanál	W (nm)	Pp (dBm)	SNR (dB)	Šum (dBm)
1	1	1574,223	-37,96	22,35	-51,12
2	2	1575,019	-35,90	24,62	-51,62
3	3	1575,780	-38,08	23,36	-52,20
4	6	1578,230	-37,22	24,47	-51,82
5	7	1579,033	-34,47	27,21	-55,64

Na obrázku 4.15 je zobrazené optické spektrum ve směru downstream(L pásmo). Z grafu můžeme vidět komunikaci pěti koncových jednotek ONU. Kanály 4 a 5 vykazovaly velký útlum, proto nebyly použity. Hodnota P_p je pouze 10 % z celkového výkonu. Všechny výsledné parametry jsou uvedeny v tabulce 4.3.



Obrázek 4.17: Optické spektrum ve směru upstream(WDM-PON).

Tabulka 4.4: Parametry pro jednotlivé kanály ve směru upstream(WDM-PON).

Špička	Kanál	W (nm)	P_p (dBm)	SNR (dB)	Šum (dBm)
1	1	1533,453	-38,55	22,10	-49,95
2	2	1534,248	-37,39	21,84	-48,43
3	3	1535,037	-32,52	25,26	-49,32
4	6	1537,430	-34,60	23,25	-48,39
5	7	1538,196	-33,03	29,62	-54,01

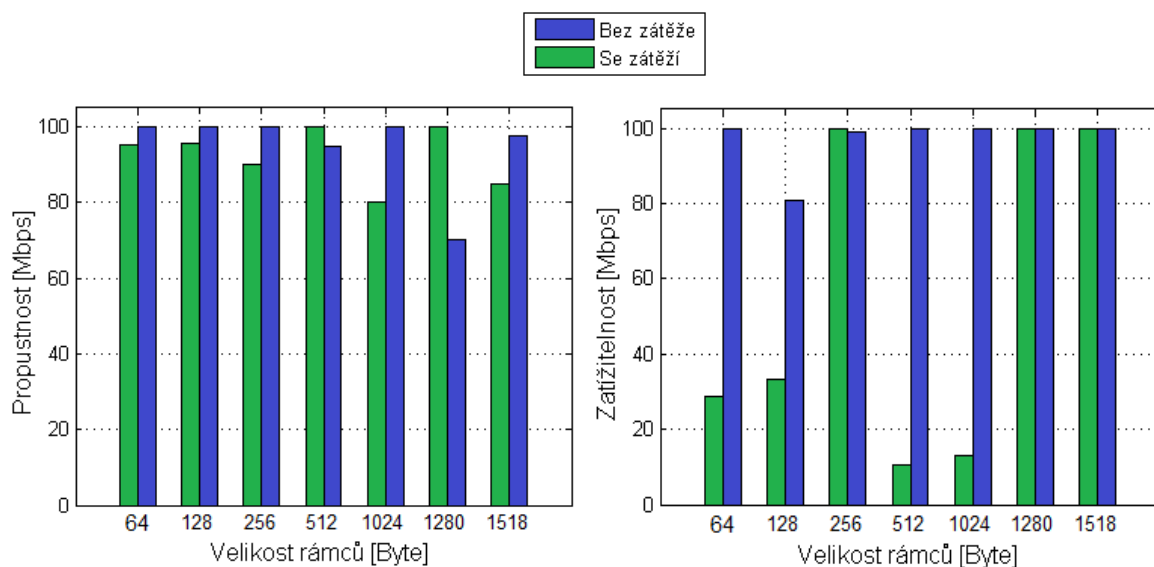
Na obrázku 4.16 je zobrazené optické spektrum ve směru upstream(C pásmo). Z grafu můžeme vidět komunikaci pěti koncových jednotek ONU. Kanály 4 a 5 vykazovaly velký útlum, proto nebyly použity. Hodnota P_p je pouze 10 % z celkového výkonu. Všechny výsledné parametry jsou uvedeny v tabulce 4.4.

4.7 Naměřené hodnoty RFC2544

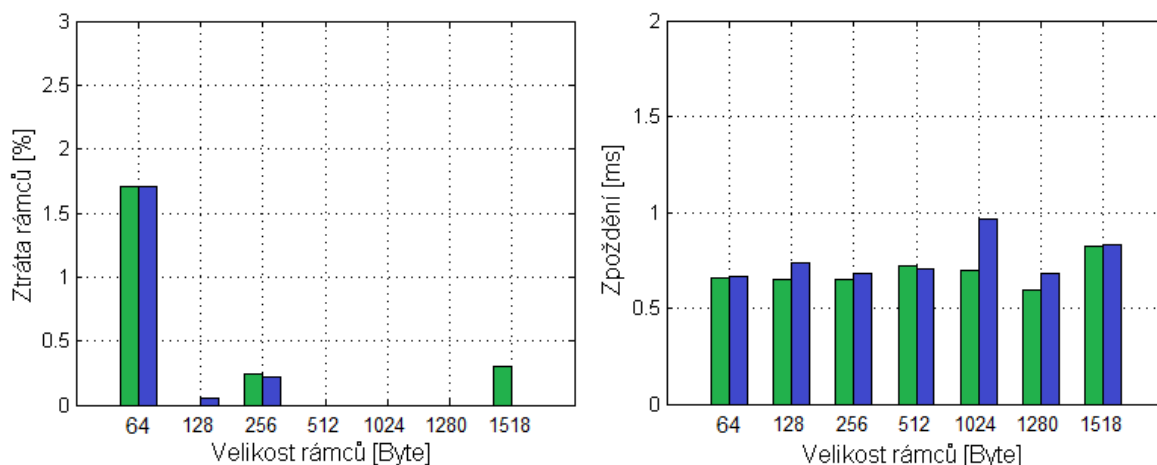
Následující grafy zobrazují naměřené hodnoty přístrojem EXFO FTB-1, které byly uloženy do reportů (grafy zobrazují vybrané hodnoty). V grafu jsou zobrazeny testy propustnosti (Throughput), zatížitelnost (Back-to-Back), ztrátovosti (Frame Loss) a zpoždění (Latency). V následujících tabulkách jsou vypsány výsledné parametry jak pro nezatíženou síť, tak pro zatíženou síť. Zatížení bylo provedeno pomocí streamování videa přes VLC server, výsledné zatížení bylo přibližně 50 Mbps.

4.7.1 Topologie GEPON

Použitá topologie pro ověření přenosových parametrů pomocí doporučení RFC 2544 je zobrazena na obrázku 4.8.



Obrázek 4.18: Test propustnosti a zatížitelnosti.

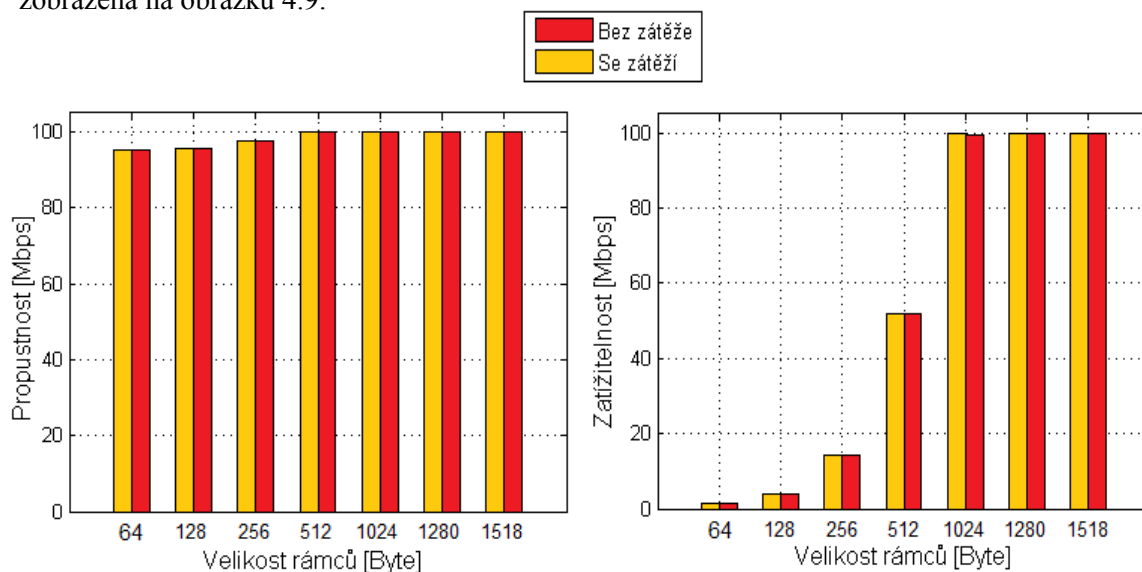


Obrázek 4.19: Test ztráty rámců a zpoždění.

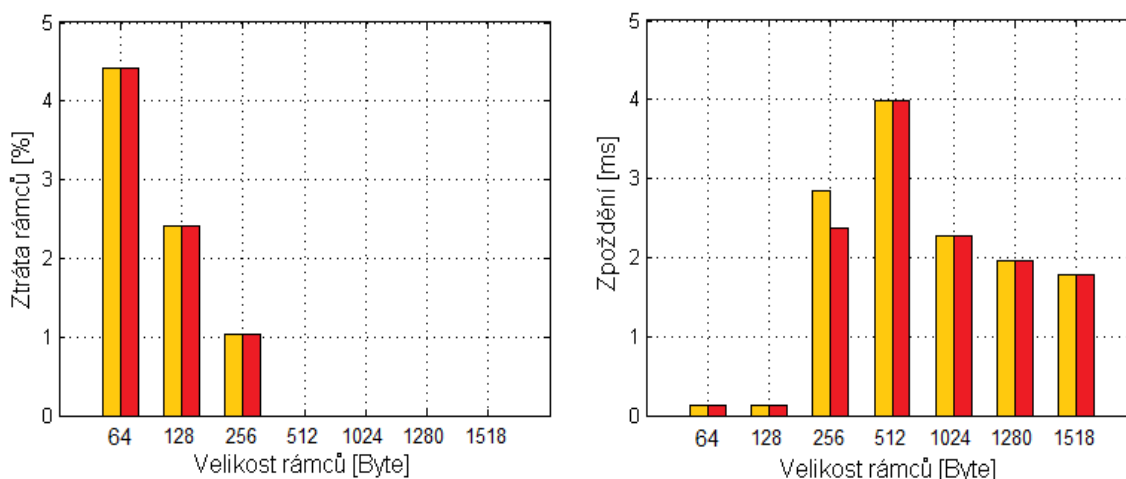
Z grafů je zřejmé, že způsobené zatížení sítě se nejvíce projevilo u testu zatížitelnosti. Test propustnosti je vyhodnocen jako vyhovující, většina hodnot dosahuje maximální velikosti 100 Mbps. Zatížitelnost měla taktéž u většiny rámců maximální hodnotu, avšak při zatížené síti rámce 64 B, 128 B, 512 B a 1024 B vykazují velký pokles. Pro rámce 512 B a 1024 B mají nevyhovující parametr zatížitelnosti. Větší ztrátovost má rámec 64 B, ovšem i tak je test ztrátovosti vyhodnocen jako vyhovující. Celá síť je vhodná pro provoz všech služeb. Ztrátovost na této síti může omezit pouze službu hlas, která při velikosti rámce 64 B, nebude tak kvalitní. Výsledné hodnoty zpoždění nijak neovlivňují provoz na síti, jelikož hodnoty jsou velice nízké.

4.7.2 Topologie WDM-PON

Použitá topologie pro ověření přenosových parametrů pomocí doporučení RFC 2544 je zobrazena na obrázku 4.9.



Obrázek 4.20: *Test propustnosti a zatížitelnosti.*

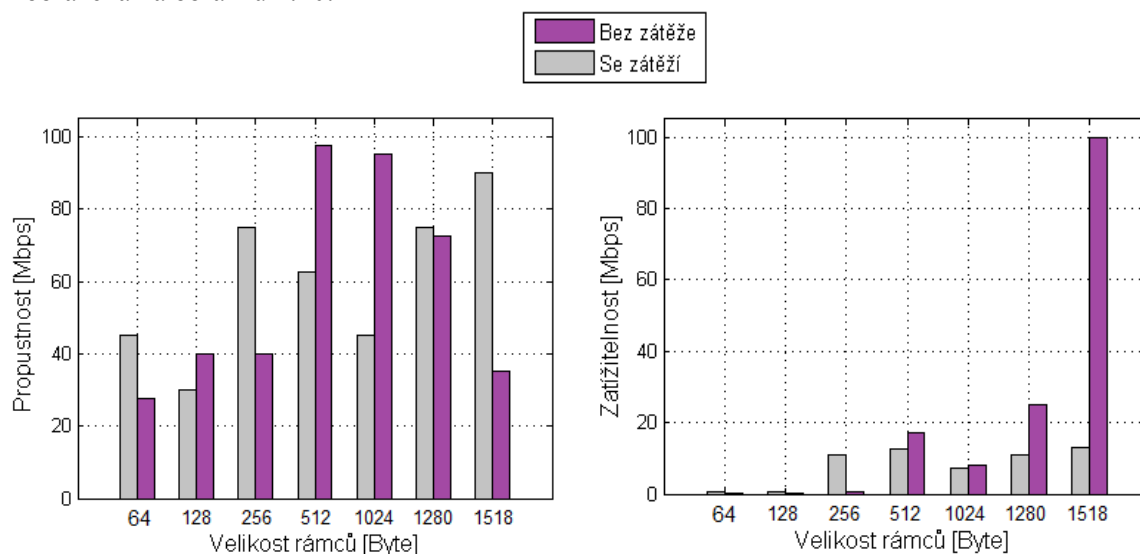


Obrázek 4.21: *Test ztráta rámců a zpoždění.*

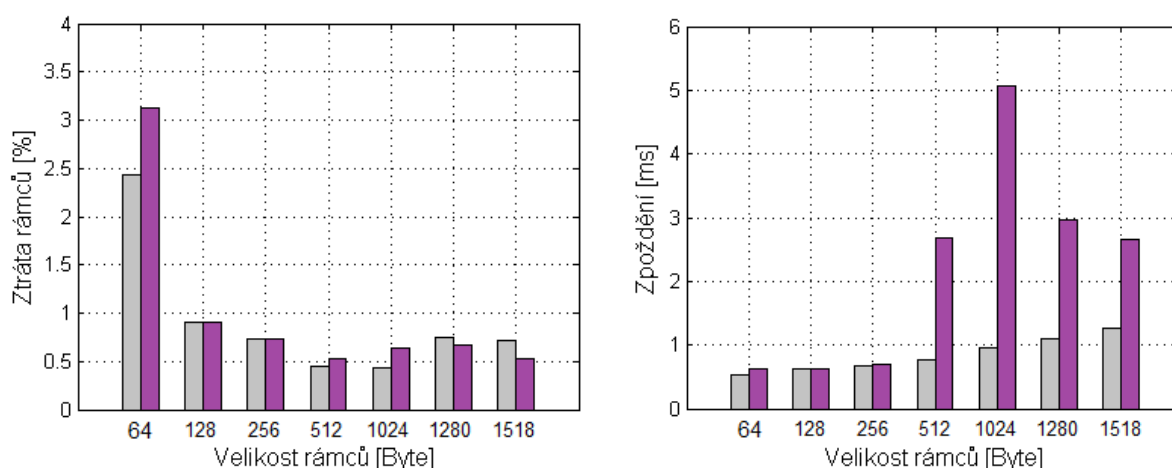
Z grafů je zřejmé, že způsobené zatížení sítě výsledek měření neovlivnilo. Test propustnosti dosahuje dostatečně vysoké hodnoty, tudíž je síť schopná poskytnout uživateli rychlost až do 100 Mbps. Test zatížitelnosti prokázal problém při přenosu rámců menších velikostí, je to však obvyklý jev. Problém vzniká při vysílání menší rámců při vysoké rychlosti, v našem případě 100 Mbps. Zařízení pracující na 2. vrstvě nestíhají tyto malé rámce rozbalit a tak jsou zahazovány. Tento jev ovlivňuje také test ztrátovost rámců. Při vyšší ztrátovosti se zhoršuje kvalita hlasu, při velikosti rámce 64 B a 128 B, by být neměla tato služba být provozována. Výsledné hodnoty zpoždění nijak neovlivňují provoz na síti, jelikož hodnoty jsou velice nízké.

4.7.3 Topologie WDM & TDM PON

Použitá topologie pro ověření přenosových parametrů pomocí doporučení RFC 2544 je zobrazena na obrázku 4.10.



Obrázek 4.22: Test propustnosti a zatížitelnosti.



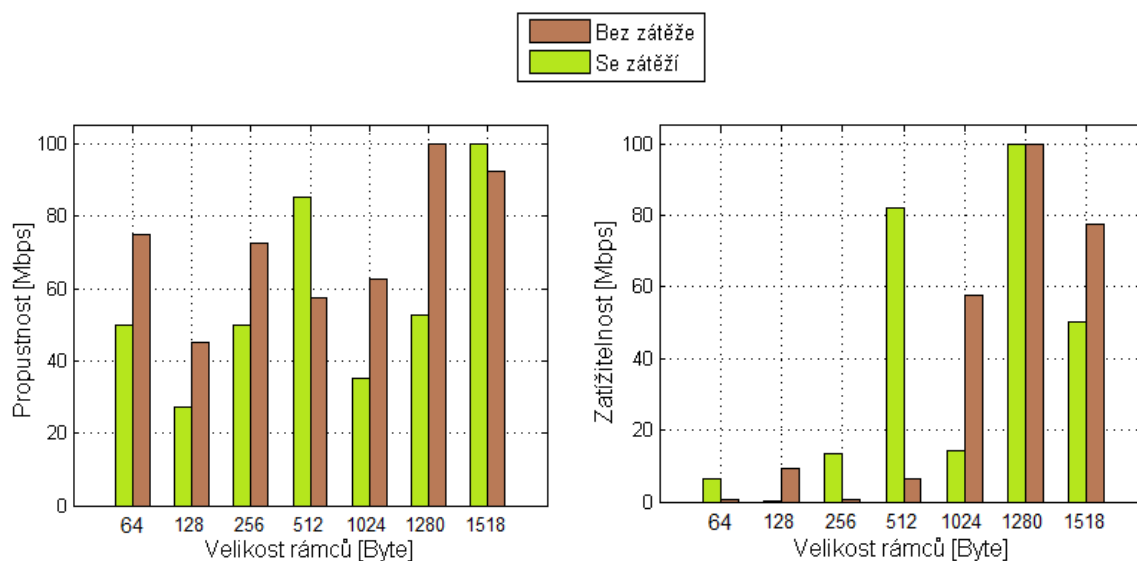
Obrázek 4.23: Test ztráta rámců a zpoždění.

Z grafů je možné vidět rozdíly při měření bez zátěže a se zátěží, hlavně u testů propustnosti a zpoždění. Propustnost této sítě dosáhla v případě rámců 512 B a 1024 B nejvyšší velikosti 97 Mbps. Nejnižší propustnost 27 Mbps byla naměřena u rámce 64 B. Test propustnosti na této síti je tedy vyhodnocen jako vyhovující, i přes nižší hodnoty u některých rámců. Zatížitelnost měla u rámce 1518 B maximální hodnotu. Pro rámec 1280 B má hodnotu 25 Mbps. Tyto rámce mají vyhovující parametr zatížitelnosti, ostatní rámce jsou vyhodnoceny jako nevyhovující. Ztrátovost se vyskytuje u všech rámců. Největší ztrátovosti dosahuje rámec o velikosti 64 B, ovšem i tak je celý pro všechny rámce vyhodnocen jako vyhovující. Parametr zpoždění měl u rámce 1024 B větší nárůst, i tak je ale zpoždění vyhovující. Celkově je síť vhodná pro provoz všech služeb, omezená je pouze pro nejmenší velikosti rámce díky menší

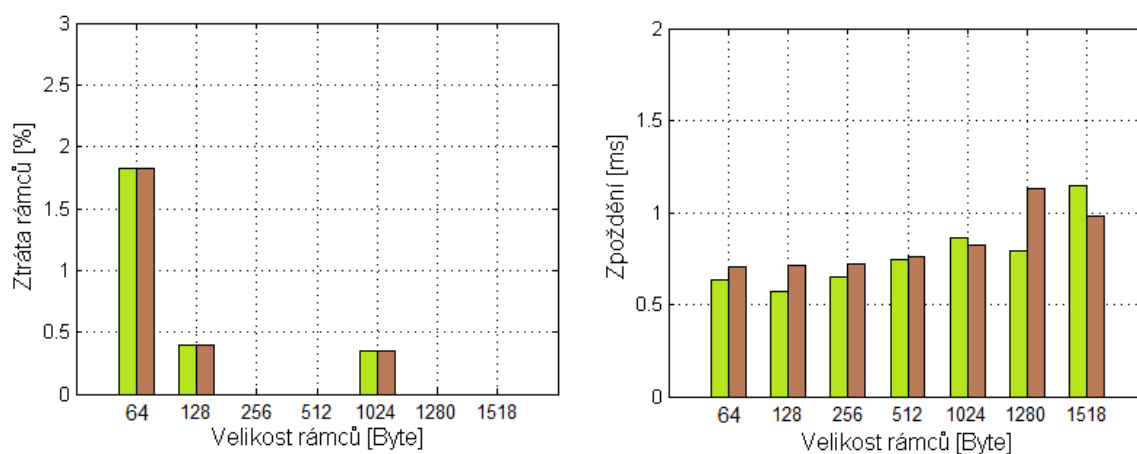
propustnosti. Při vyšší ztrátovosti se zhoršuje kvalita hlasu, při velikosti rámce 64 B, by neměla být tato služba být provozována. Výsledné hodnoty testu zpoždění nijak neovlivňují provoz na síti, jelikož hodnoty jsou velice nízké.

4.7.4 Topologie GEPON a WDM-PON na společném vlákne

Použitá topologie pro ověření přenosových parametrů pomocí doporučení RFC 2544 je zobrazena na obrázku 4.11. Na této topologii jsou provedené měření na koncových jednotkách WDM-PON i GEPON.

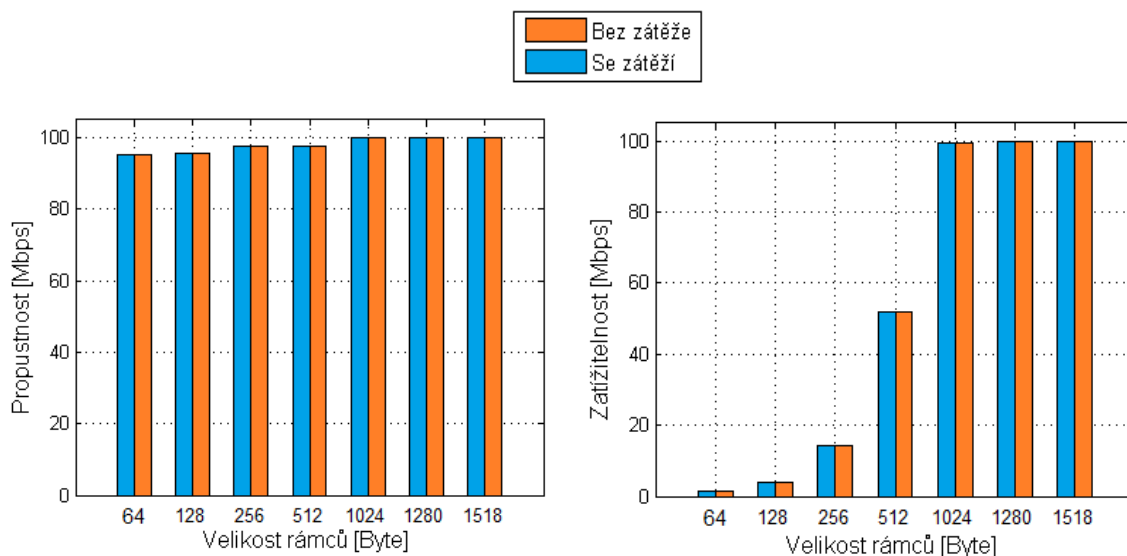


Obrázek 4.24: Test propustnosti a zatížitelnosti na koncových jednotkách GEPON.

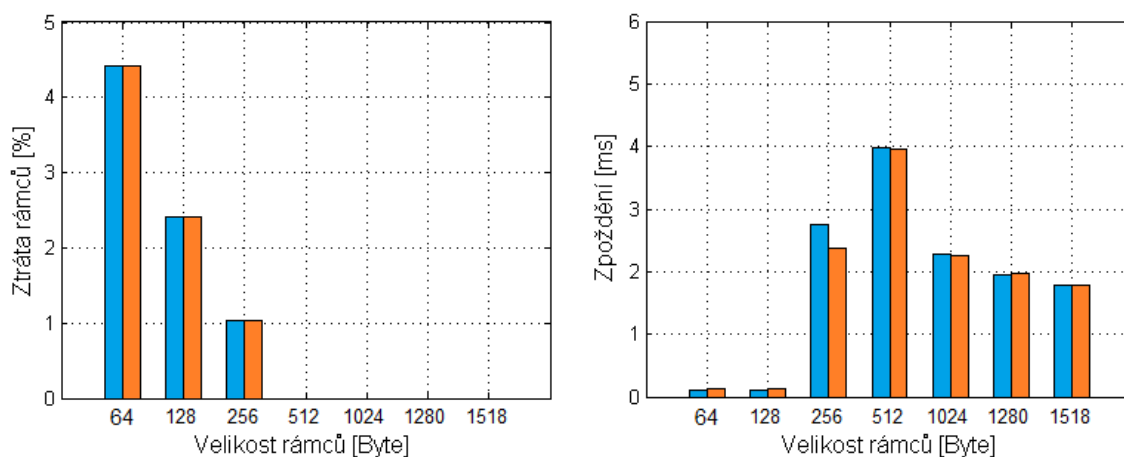


Obrázek 4.25: Test ztráty rámců a zpoždění na koncových jednotkách GEPON.

Z grafů je zřejmé, že způsobené zatížení sítě se nejvíce projevilo u testu propustnosti a zatížitelnosti. Test propustnosti dosahuje dostatečně vysoké hodnoty, tudíž je vyhodnocen jako vyhovující. Zatížitelnost měla u rámce 1280 B maximální hodnotu. Pro rámec menší velikosti byly hodnoty příliš nízké. Tyto rámce mají nevyhovující parametr zatížitelnosti, ostatní rámce od 512 B po 1518 B jsou vyhodnoceny jako vyhovující. Větší ztrátovost má rámec 64 B, ovšem i tak je test ztrátovosti vyhodnocen jako vyhovující. Celá síť je vhodná pro provoz všech služeb. Ztrátovost na této síti může omezit pouze službu hlas, která při velikosti rámce 64 B, nebude tak kvalitní. Výsledné hodnoty zpoždění nijak neovlivňují provoz na síti, jelikož hodnoty jsou velice nízké.



Obrázek 4.26: Test propustnosti a zatížitelnosti na koncových jednotkách WDM-PON.



Obrázek 4.27: Test ztráty rámců a zpoždění na koncových jednotkách WDM-PON.

Výsledek měření je totožný s testem pro samotnou síť WDM-PON, z toho můžeme odvodit, že se technologie GEAPON a WDM-PON neovlivňují při nasazení na jedno optické vlákno. Test propustnosti dosahuje dostatečně vysoké hodnoty, tudíž je síť schopná poskytnout uživateli rychlost až do 100 Mbps. Test zatížitelnosti prokázal problém při přenosu rámců menších velikostí, je to však obvyklý jev. Problém vzniká při vysílání menší rámců při vysoké rychlosti, v našem případě 100 Mbps. Zařízení pracující na 2. vrstvě nestíhají tyto malé rámce rozbalit a tak jsou zahazovány. Tento jev ovlivňuje také test ztrátovost rámců. Při vyšší ztrátovosti se zhoršuje kvalita hlasu, při velikosti rámce 64 B a 128 B, by být neměla tato služba být provozována. Zpoždění nijak neovlivňují provoz na síti, jelikož hodnoty jsou velice nízké.

4.8 Naměřené hodnoty ITU-T Y.156sam (EtherSAM)

Měření bylo uskutečněno pomocí přístroje EXFO FTB-860 NetBlazer. Délka jednotlivých testů byla okolo 5 minut. Pro následující vyhodnocení byly využité výsledné hodnoty z testu kvality služeb (Service Performance Test). Jedná se o parametry avg. Throughput (propustnost), frame loss (ztráta rámců), max. jitter (variabilita zpoždění) a round-trip latency (zpoždění). Pro měření navržených topologií byly definovány 3 služby: IPTV, VoIP a přenos dat. Pro službu IPTV byly testovány profily HDTV (MPEG-2), HDTV (MPEG-4) a SDTV (MPEG-2). Pro službu VoIP byly testovány profily G.711, G.723.1 a G.729. Pro poslední službu přenos data, byly nastaveny přenosové rychlosti 10 Mbps, 20 Mbps a 30 Mbps.

Tabulka 4.5: *Profilu pro měření kvality Triple Play.*

Profile	IPTV	VoIP	Přenos dat
1	HDTV (MPEG-2) 20,433 Mbps	G.711 0,126 Mbps	10 Mbps
2	HDTV (MPEG-4) 10,592 Mbps	G.723.1 0,039 Mbps	20 Mbps
3	SDTV (MPEG-2) 3,972 Mbps	G.729 0,027 Mbps	30 Mbps

U služeb Video (IPTV) jsou kladeny nižší nároky na jitter a zpoždění. V případě služeb hlasových (VoIP) jsou kritéria přísnější, pro kvalitní přenos je požadována nízká ztrátovost rámců (do 0,5%), zpoždění v rozmezí 0-150 ms a hodnota kolísání zpoždění je okolo 10ms. U služby Data parametry zpoždění a jitter nemají vliv na kvalitu, ohled se bere na hodnotu ztráta rámců, která je určena dostupnou šířkou pásma.

Metodika EtherSAM je určená pro měření na síti bez provozu (Out-of-Service), kdy v měřené síti nebude přenášen datový provoz. Mým zadáním však bylo, aby testy kvality Triple Play byly provedeny jak pro nezatíženou síť, tak i pro zatíženou síť. V následujících tabulkách jsou vypsány výsledné hodnoty. Zatížení bylo provedeno pomocí streamováním videa přes VLC server, výsledné zatížení bylo přibližně 50 Mbps.

Pro každou navrženou topologii je využita jedna tabulka, ve které je testován profil 1 (viz. tabulka 4.5). Tabulky s výsledky ostatních profilů je možné vidět v příloze A.

4.8.1 Topologie GEPON

Použitá topologie pro ověření kvality Triple Play pomocí standardu EtherSAM je zobrazena na obrázku 4.8.

Tabulka 4.6: *Výsledné hodnoty pro GEPON(Profil 1).*

	Bez zátěže	Se zátěží
Služba 1 – Video HDTV (MPEG-2)		
CIR [Mbps]	20,443	20,443
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,021	8,434
Zpoždění [ms]	8,964	11,376
Avg. propustnost	20,444	20,444
Služba 2 – Hlas (VoIP G.711)		
CIR [Mbps]	0,126	0,126
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	7,806	7,661
Zpoždění [ms]	8,966	10,923
Avg. propustnost	0,126	0,126
Služba 3 – Data (10 Mbps)		
CIR [Mbps]	10	10
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,254	8,434
Zpoždění [ms]	8,971	11,333
Avg. propustnost	10	10

Z výsledků uvedených v tabulce 4.6 je patrné, že všechny služby splňují podmínky pro kvalitní přenos. Tudíž celkový verdikt tohoto testu je PASS (test prošel). Rozdíl mezi testy na zatížené síti a nezatížené síti jsou minimální. Zátěž 50 Mbps na testy propustnosti a ztrátovosti rámců neměla žádný vliv. Rozdílné hodnoty vycházely u testu zpoždění, na zatížené síti byl rozdíl průměrně 2 ms. Tento malý rozdíl však vůbec neovlivní kvalitu služeb.

4.8.2 Topologie WDM-PON

Použitá topologie pro ověření kvality Triple Play pomocí standardu EtherSAM je zobrazena na obrázku 4.9.

Z výsledků uvedených v tabulce 4.7 je patrné, že všechny služby splňují podmínky pro kvalitní přenos. Tudiž celkový verdikt tohoto testu je PASS (test prošel). Rozdíl mezi testy na zatížené síti a nezatížené síti jsou minimální. Zátěž 50 Mbps na testy neměla vliv. Oproti předešlé topologii (GEAPON) je vidět, že WDM-PON má velmi nízké hodnoty max. jitteru a zpoždění. Toto dokazuje velmi velkou kvalitu technologie WDM-PON.

Tabulka 4.7: *Výsledné hodnoty pro WDM-PON(Profil I).*

	Bez zátěže	Se zátěží
Služba 1 – Video HDTV (MPEG-2)		
CIR [Mbps]	20,443	20,443
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,039	0,074
Zpoždění [ms]	0,509	0,545
Avg. propustnost	20,444	20,444
Služba 2 – Hlas (VoIP G.711)		
CIR [Mbps]	0,126	0,126
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,362	0,360
Zpoždění [ms]	0,509	0,509
Avg. propustnost	0,126	0,126
Služba 3 – Data (10 Mbps)		
CIR [Mbps]	10	10
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,382	0,381
Zpoždění [ms]	0,510	0,519
Avg. propustnost	10	10

4.8.3 Topologie WDM & TDM PON

Použitá topologie pro ověření kvality Triple Play pomocí standardu EtherSAM je zobrazena na obrázku 4.10.

Z výsledků uvedených v tabulce 4.8 je patrné, že všechny služby splňují podmínky pro kvalitní přenos. Tudiž celkový verdikt tohoto testu je PASS (test prošel). Rozdíl mezi testy na zatížené síti a nezatížené síti jsou minimální. Zátěž 50 Mbps na testy neměla téměř vliv. Dále tento test dokazuje možnost použití technologie WDM/TDM PON, tedy nasazení optické přístupové sítě nové generace na stávající topologie.

Tabulka 4.8: Výsledné hodnoty pro WDM & TDM PON(Profil 1).

	Bez zátěže	Se zátěží
Služba 1 – Video HDTV (MPEG-2)		
CIR [Mbps]	20,443	20,443
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	7,924	7,939
Zpoždění [ms]	9,235	9,251
Avg. propustnost	20,444	20,444
Služba 2 – Hlas (VoIP G.711)		
CIR [Mbps]	0,126	0,126
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	7,477	7,889
Zpoždění [ms]	9,063	9,186
Avg. propustnost	0,126	0,126
Služba 3 – Data (10 Mbps)		
CIR [Mbps]	10	10
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,1	8,096
Zpoždění [ms]	9,268	9,280
Avg. propustnost	9,999	10

4.8.4 Topologie GEAPON a WDM-PON na společném vlákne

Použitá topologie je zobrazena na obrázku 4.11.

Tabulka 4.9: Výsledné hodnoty na koncových jednotkách GEAPON(Profil 1).

	Bez zátěže	Se zátěží
Služba 1 – Video HDTV (MPEG-2)		
CIR [Mbps]	20,443	20,443
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,014	8,395
Zpoždění [ms]	8,931	11,369
Avg. propustnost	20,444	20,444
Služba 2 – Hlas (VoIP G.711)		
CIR [Mbps]	0,126	0,126
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	7,858	7,663
Zpoždění [ms]	8,860	10,925
Avg. propustnost	0,126	0,126
Služba 3 – Data (10 Mbps)		
CIR [Mbps]	10	10
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,120	8,244
Zpoždění [ms]	8,937	11,471
Avg. propustnost	10	10

Tabulka 4.10: Výsledné hodnoty na koncových jednotkách WDM-PON(Profil 1).

	Bez zátěže	Se zátěží
Služba 1 – Video HDTV (MPEG-2)		
CIR [Mbps]	20,443	20,443
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,039	0,075
Zpoždění [ms]	0,510	0,548
Avg. propustnost	20,444	20,444
Služba 2 – Hlas (VoIP G.711)		
CIR [Mbps]	0,126	0,126
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,226	0,360
Zpoždění [ms]	0,509	0,509
Avg. propustnost	0,126	0,126
Služba 3 – Data (10 Mbps)		
CIR [Mbps]	10	10
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,246	0,384
Zpoždění [ms]	0,510	0,520
Avg. propustnost	10	10

Z výsledků uvedených v tabulkách 4.9 a 4.10 je patrné, že se technologie GEAPON a WDM-PON neovlivňují při nasazení na jedno optické vlákno, což bylo cílem této fáze měření. Výsledky testů na koncových jednotkách GEAPON odpovídají naměřeným hodnotám při využití topologie GEAPON. Výsledky testů na koncových jednotkách WDM-PON odpovídají naměřeným hodnotám při využití topologie WDM-PON.

Závěr

Bakalářská práce se zabývá problematikou optických přístupových sítí nové generace. Největší důraz je kladen na síť WDM-PON, která byla k dispozici při měření v laboratorních podmínkách. Cílem této práce je studium nasazení optické přístupové sítě nové generace na stávající topologii.

Teoretická část bakalářské práce poskytne detailní popis vlastností optických přístupových sítí nové generace. Pro správné pochopení tohoto tématu, se muselo nejprve vysvětlit, co optická přístupová síť znamená. Právě optická přístupová síť je obsahem první kapitoly. Její základní rozdělení, způsob zakončení vlákna u uživatelů, dále pak základní funkční bloky optické sítě a základní topologie. Druhá kapitola popisuje pasivní optické přístupové sítě, mezi které patří APON, BPON, GPON a EPON. Poslední kapitola teoretické části se zabývá již zmíněnými optickými sítěmi nové generace. Značná část této kapitoly je věnována právě sítím WDM-PON.

V praktické části je testováno možné nasazení WDM-PON na stávající GEAPON síť. Následné měření bylo uskutečněno na čtyřech variantách topologie. První topologie představuje optickou přístupovou síť GEAPON, druhá topologie je navržena pro optickou přístupovou síť WDM-PON, třetí topologie slučuje síť WDM-PON s GEAPON sítí, vzniká tak technologie WDM/TDM PON. Poslední varianta topologie je spojení sítě WDM-PON s GEAPON sítí do jednoho optického vlákna přes optický dělič v poměru 50:50. Všechna naměřená data byla získána pomocí měřicích přístrojů firmy EXFO, jedná se o EXFO FTB-1/FTB-860 NetBlazer a EXFO FTB-400. Přístroj EXFO FTB-400 sloužil jako spektrální analyzátor, tímto přístrojem byla ověřena funkčnost navržených topologií. Přístroj EXFO FTB-1/FTB-860 NetBlazer obsahuje metodiku RFC 2544 a ITU-T Y.156sam (EtherSAM) pomocí kterých se ověřily přenosové parametry sítě a kvalita Triple Play služeb. Měření probíhalo jak pro nezatíženou síť, tak i pro zatíženou síť. Zatížení bylo provedeno pomocí streamováním videa přes VLC server, výsledné zatížení bylo přibližně 50 Mbps. V případě testování pomocí RFC 2544 u topologie GEAPON nebyly výsledky až tak kvalitní, jelikož technologie GEAPON je velice ovlivnitelná na vnější vlivy, ale může si to dovolit, protože koncová jednotka AT-ON1000 přijímá na velkém spektrálním rozsahu.

Zhodnocením všech měření bylo dospěno k závěru, že síť WDM-PON může být bez problému nasazována na stávající topologie GEAPON. Tyto sítě můžou navzájem komunikovat, aniž by se ovlivňovali.

Použitá literatura

- [1] LAM, Cedric F. Passive optical network: principles and practice. Boston: Elsevier/Academic Press, c2007, 324 p. ISBN 01-237-3853-9.
- [2] PROFIBER. *Profiber* [online]. 2010 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.profiber.eu/>
- [3] PRAT, Josep. Next-generation FTTH passive optical networks. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-140-2084-690.
- [4] ŠIŠKA, Petr. Optoelektronika: Přednáška č. 5. 2012.
- [5] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. Definice přístupových sítí nové generace. [online]. 2013 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/tiskove-zpravy/rok_2013/tz08_14022013_program-podpory-projekty_vysvetleni.pdf
- [6] LAM, Cedric, Passive optical network. [cit. 2014-04-24]. Výhody a problémy WDM-PON. 72p.
- [7] LAFATA, Pavel. Pasivní optické sítě WDM-PON. [online]. [cit. 2014-4-21]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2009050004>
- [8] VODRÁŽKA, Jiří. Optické přístupové sítě EPON a CWDM. In: *Optické přístupové sítě EPON a CWDM* [online]. 2005 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=&cislocclanku=2005070401>
- [9] LAFATA, Pavel; VODRÁŽKA, Jiří. Současné a budoucí varianty pasivních optických přístupových sítí. *Elektrorevue* [online]. 26.7.2009. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/>. ISSN 1213-1539.
- [10] Next-Generation PON Evolution. In: *Next-Generation PON Evolution* [online]. 2010 [cit. 2014-5-1]. Dostupné z: <http://www.huawei.com/en/static/hw-077443.pdf>
- [11] RUDINSKÝ, J. Sítě nové generace – NGN. In: *Sítě nové generace - NGN* [online]. 04.05.2006. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2006050401>
- [12] NĚMEČEK, Ivo. Architektury a technologie v moderních optických DWDM sítích 1/2. In: *Architektury a technologie v moderních optických DWDM sítích 1/2* [online]. 2010 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.netguru.cz/odborne-clanky/architektury-a-technologie-v-modernich-optickych-sitich-12.html>
- [13] VOZŇÁK, Miroslav. Spojovací soustavy: Přednáška č. 12. 2011.
- [14] ARNASON, Bernie. Next Generation FTTP Standard, NG-PON2, Begins to Emerge. In: *Next Generation FTTP Standard, NG-PON2, Begins to Emerge* [online]. 2012 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.telecompetitor.com/next-generation-ftp-standard-ng-pon2-begins-to-emerge/>

- [15] IETF, Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices: RFC 2544. Network Working Group, [online]. 1999 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt>
- [16] ITU-T. Y.1564: Ethernet service activation test methodology. [online]. Geneva, 2011 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1564/en>.
- [17] KOUDELKA, Petr; LÁTAL, Jan. Optoelektronika III: Výstavba optické přístupové sítě na bázi EPON. VŠB-TU Ostrava: 04.01.2012. 11 s.
- [18] THEODORAS, Jim; RETTENBERGER, Stephan. Introducing WDM into Next-Generation Access Networks. ADVA Optical Networking. 2012. 11 s.
- [19] LIN, Chinlon. *Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home: systems technologies and deployment strategies*. Hoboken, NJ: Wiley, c2006, xxix, 302 p. ISBN 978-047-0094-785.
- [20] LAFATA, Pavel. Základy FTTx. [online]. 23.05.2009 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2006051702>

Seznam příloh

Příloha A:	Naměřené hodnoty ITU-T Y.156sam (EtherSAM).....	I
Příloha B:	Blokové schéma zapojení integrované sítě (Výsledky měření útlumu)	IV

Součástí BP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

1. Výsledky měření kvality Triple play služeb.
2. Výsledky měření RFC 2544.
3. Výsledky měření spektrálním analyzátozem.
4. Elektronická podoba bakalářské práce.
5. Blokové schéma zapojení integrované sítě.

Příloha A: *Naměřené hodnoty ITU-T Y.156sam (EtherSAM)*

Tabulka A.1: *Výsledné hodnoty pro GEAPON(Profil 2,3).*

	Bez zátěže	Se zátěží	Bez zátěže	Se zátěží
	HDTV (MPEG-4)		SDTV (MPEG-2)	
CIR [Mbps]	10,592	10,592	3,927	3,927
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,105	8,328	8,110	9,122
Zpoždění [ms]	8,976	11,150	8,986	11,119
Avg. propustnost	10,593	10,593	3,927	3,927
	Hlas (VoIP G.723.1)		Hlas (VoIP G.729)	
CIR [Mbps]	0,039	0,039	0,027	0,027
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	7,807	8,367	7,799	7,993
Zpoždění [ms]	8,968	9,906	8,954	9,827
Avg. propustnost	0,039	0,039	0,027	0,027
	Data (20 Mbps)		Data (30 Mbps)	
CIR [Mbps]	20	20	30	30
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,254	8,405	8,351	9,367
Zpoždění [ms]	8,971	11,490	8,987	11,492
Avg. propustnost	20	20	30	29,999

Tabulka A.2: *Výsledné hodnoty pro WDM-PON(Profil 2,3).*

	Bez zátěže	Se zátěží	Bez zátěže	Se zátěží
	HDTV (MPEG-4)		SDTV (MPEG-2)	
CIR [Mbps]	10,592	10,592	3,972	3,972
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,039	0,048	0,039	0,047
Zpoždění [ms]	0,510	0,518	0,509	0,517
Avg. propustnost	10,593	10,593	3,972	3,972
	Hlas (VoIP G.723.1)		Hlas (VoIP G.729)	
CIR [Mbps]	0,039	0,039	0,027	0,027
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,226	0,371	0,376	0,375
Zpoždění [ms]	0,509	0,516	0,509	0,509
Avg. propustnost	0,039	0,039	0,027	0,027
	Data (20 Mbps)		Data (30 Mbps)	
CIR [Mbps]	20	20	30	30
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,383	0,383	0,359	0,362
Zpoždění [ms]	0,510	0,519	0,510	0,520
Avg. propustnost	20	20	30	30

Tabulka A.3: *Výsledné hodnoty pro WDM & TDM PON (Profil 2,3).*

	Bez zátěže	Se zátěží	Bez zátěže	Se zátěží
	HDTV (MPEG-4)		SDTV (MPEG-2)	
CIR [Mbps]	10,592	10,592	3,927	3,927
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,023	7,958	8,130	8,048
Zpoždění [ms]	9,251	9,248	9,258	9,219
Avg. propustnost	10,593	10,593	3,927	3,927
	Hlas (VoIP G.723.1)		Hlas (VoIP G.729)	
CIR [Mbps]	0,039	0,039	0,027	0,027
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,320	8,356	8,276	8,106
Zpoždění [ms]	9,251	9,203	9,063	9,217
Avg. propustnost	0,039	0,039	0,027	0,027
	Data (20 Mbps)		Data (30 Mbps)	
CIR [Mbps]	20	20	30	30
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,309	8,271	8,290	8,401
Zpoždění [ms]	9,280	9,263	9,251	9,294
Avg. propustnost	20	20	30	29,999

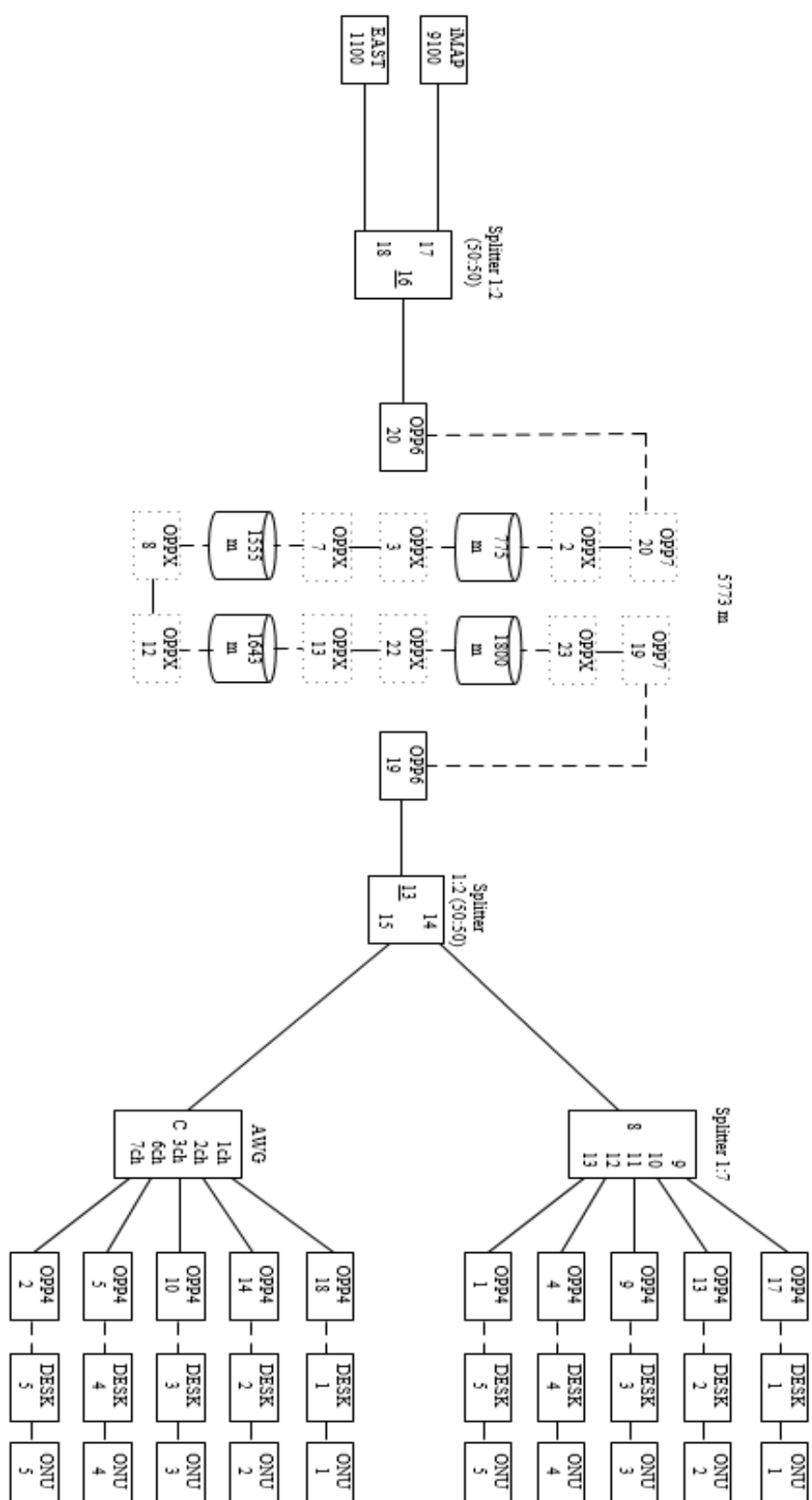
Tabulka A.4: *Výsledné hodnoty na koncových jednotkách GEPON (Profil 2,3).*

	Bez zátěže	Se zátěží	Bez zátěže	Se zátěží
	HDTV (MPEG-4)		SDTV (MPEG-2)	
CIR [Mbps]	10,592	10,592	3,927	3,927
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,112	8,428	8,111	9,132
Zpoždění [ms]	8,954	11,255	8,976	11,120
Avg. propustnost	10,593	10,593	3,927	3,927
	Hlas (VoIP G.723.1)		Hlas (VoIP G.729)	
CIR [Mbps]	0,039	0,039	0,027	0,027
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	7,814	8,397	7,841	7,837
Zpoždění [ms]	8,868	9,916	8,943	9,834
Avg. propustnost	0,039	0,039	0,027	0,027
	Data (20 Mbps)		Data (30 Mbps)	
CIR [Mbps]	20	20	30	30
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	8,311	8,405	8,321	9,461
Zpoždění [ms]	8,981	11,386	8,987	11,498
Avg. propustnost	20	20	30	30

Tabulka A.5: *Výsledné hodnoty na koncových jednotkách WDM-PON (Profil 2,3).*

	Bez zátěže	Se zátěží	Bez zátěže	Se zátěží
	HDTV (MPEG-4)		SDTV (MPEG-2)	
CIR [Mbps]	10,592	10,592	3,972	3,972
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,039	0,048	0,039	0,047
Zpoždění [ms]	0,509	0,519	0,509	0,518
Avg. propustnost	10,593	10,593	3,972	3,972
	Hlas (VoIP G.723.1)		Hlas (VoIP G.729)	
CIR [Mbps]	0,039	0,039	0,027	0,027
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,227	0,381	0,376	0,375
Zpoždění [ms]	0,509	0,516	0,509	0,509
Avg. propustnost	0,039	0,039	0,027	0,027
	Data (20 Mbps)		Data (30 Mbps)	
CIR [Mbps]	20	20	30	30
Ztráta rámců [%]	0,000	0,000	0,000	0,000
Max. Jitter [ms]	0,383	0,383	0,359	0,362
Zpoždění [ms]	0,510	0,519	0,510	0,520
Avg. propustnost	20	20	30	30

Příloha B: *Blokové schéma zapojení integrované sítě*



Obrázek B.1: *Schéma zapojení integrované sítě.*

Měření útlumu metodou vložných ztrát, 1c

Tabulka B.1: *Splitter 1:2 (99:1).*

1:2 (99:1) 1; 2 - 3			1:2 (99:1) 4; 5 - 6		
	1 - 2 [dB]	1 - 3 [dB]		4 - 5 [dB]	4 - 6 [dB]
1310 nm	0,5	20,28	1310 nm	0,48	19,66
1550 nm	0,42	19,47	1550 nm	0,44	20,16

Tabulka B.2: *Splitter 1:2 (90:10).*

1:2 (90:10) 7; 8 - 9			1:2 (90:10) 10; 11 - 12		
	7 - 8 [dB]	7 - 9 [dB]		10 - 11 [dB]	10 - 12 [dB]
1310 nm	0,52	10,38	1310 nm	0,54	10,1
1550 nm	0,59	10,41	1550 nm	0,56	10

Tabulka B.3: *Splitter 1:2 (50:50).*

1:2 (50:50) 13; 14 - 15			1:2 (50:50) 16; 17 - 18		
	13 - 14 [dB]	13 - 15 [dB]		16 - 17 [dB]	16 - 18 [dB]
1310 nm	3,19	3,26	1310 nm	3,69	3,75
1550 nm	3,2	3,25	1550 nm	4,44	4,26

Tabulka B.4: *Splitter 1:7.*

1:7 9; 10 - 14					
	9 - 10 [dB]	9 - 11 [dB]	9 - 12 [dB]	9 - 13 [dB]	9 - 14 [dB]
1310 nm	7,58	7,77	8,12	7,45	7,57
1550 nm	7,58	7,61	8,58	7,45	8,1

Tabulka B.5: *Splitter 1:7.*

1:7 9; 10 - 14					
	9 - 10 [dBm]	9 - 11 [dBm]	9 - 12 [dBm]	9 - 13 [dBm]	9 - 14 [dBm]
1310 nm	-4,15	-4,28	-4,67	-4,07	-4,12
1550 nm	-4,32	-4,32	-5,32	-4,15	-4,84

Tabulka B.6: *Splitter 1:32.*

1:32 1; 2 - 5					
	1 - 2 [dB]	1 - 3 [dB]	1 - 4 [dB]	1 - 5 [dB]	1 - 6 [dB]
1310 nm	16,06	15,75	16,14	15,76	16,05
1550 nm	15,59	15,52	15,56	15,52	15,73

Tabulka B.7: *Optické vlákna.*

OPPX	2 – 3 [dB]	7 – 8 [dB]	12 – 13 [dB]	17 – 18 [dB]	22 – 23 [dB]
1310 nm	0,49	1,27	1,11	1,52	1,16
1550 nm	0,22	0,80	0,98	3,56	1,03
m	775	1555	1643	1711	1800

Optické vlákno 17 – 18 v topologii nepoužito, kvůli změřenému vysokému útlumu.

Tabulka B.7: *Špulky.*

	2 – 3	7 – 8	12 – 13	17 – 18	22 - 23
Útlum [dB]	0,194	0,418	0,411	0,445	0,346
Délka [m]	775	1555	1643	1711	1800